

---

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ  
КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

---

АЛГОРИТМИЧЕСКИЙ ПОДХОД ПРИ СОСТАВЛЕНИИ ЦИФРОВЫХ  
ПОЧВЕННЫХ КАРТ НА ОСНОВЕ ЛАБОРАТОРНО-ПОЛЕВЫХ  
И СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ

© 2013 г. Н. В. Гопп

*Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, Новосибирск*

*E-mail: natalia.gopp@gmail.com*

Поступила в редакцию 12.07.2013 г.

В работе рассматривается методика составления цифровых почвенных карт с использованием параметров растительности и рельефа, рассчитываемых по спутниковым снимкам (Landsat ETM+, SPOT 4) и матрицам высот поверхности Земли (SRTM90). На примере ключевого участка показана возможность эффективного использования материалов лабораторно-полевых и спутниковых данных для дешифрирования ареалов почв по косвенным признакам.

**Ключевые слова:** картографирование почв, дистанционное зондирование Земли, цифровая почвенная картография

DOI: 10.7868/S0205961413020036

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время использование алгоритмического подхода при обработке спутниковых и лабораторно-полевых данных является неотъемлемой составляющей при картографировании почв. Сложность объекта исследования и многообразие факторов, участвующих в формировании почв, требуют привлечения обширной информации, а их обработка традиционными методами нередко оказывается недостаточной и увеличивает сроки изготовления карт. Алгоритмы принятия решений для задач классификации разнородных пространственных данных позволяют на новом методологическом уровне создавать производные тематические карты, что является оптимальным решением при изучении географических особенностей распространения почв.

Основные трудности картографирования почвенного покрова по спутниковым снимкам связаны с “закрытостью” почв растительностью, высокой пространственно-временной изменчивостью физико-химических свойств почв и недостаточностью оперативных пространственных данных среднего и высокого разрешения. Рассмотрим возможности различных подходов к дешифрированию почв по космическим снимкам. Классические методики визуально-инструментального дешифрирования почв, не покрытых и полностью покрытых растительностью, принципиально различаются тем, что осуществляются они соответственно по прямым и косвенным признакам, ко-

торые в свою очередь подразделяются на оптические, геометрические, структурные и текстурные. При дешифрировании почв, не покрытых растительностью, в основном используются оптические признаки (тон и цвет изображения). Однако следует подчеркнуть, что тон изображения одного и того же объекта на разновременных спутниковых снимках может быть более или менее различным, так как на него влияет очень много факторов. Тон зависит от освещенности поверхности и ее структуры, влажности, от способности поверхности рассеивать свет, от цвета поверхности и т.д. (Почвенная съемка, 1959). Все перечисленные особенности сильно усложняют сравнение результатов исследований, полученных от разновременных спутниковых съемок, что ставит под сомнение вопрос о строгом соответствии выявляемых идентификационных признаков классификационным единицам почв. Во-первых, очень трудно установить момент, когда почвы находятся в одинаковых условиях съемки и одинаковом состоянии, во-вторых, идентификационные признаки некоторых почв могут быть не отличимы друг от друга. Скорее всего, здесь следует сказать, что снимки эффективны в качестве географической основы для проведения картографических почвенных работ и определения пространственных границ (контурное дешифрирование) по прямым и косвенным признакам, а не для установления классификационной принадлежности почв (идентификационное дешифрирование). Установление классификационной принадлежности почв, а также прямых

или косвенных идентификационных признаков в таком случае осуществляется в полевых подспутниковых исследованиях.

Проблемы дешифрирования почв, полностью покрытых растительностью, связаны с “закрытостью” объекта и, следовательно, с отсутствием прямых дешифровочных признаков. Для таких территорий ведущую роль при дешифрировании почвенного покрова играет ландшафтная индикация. Согласно С.В. Викторову, ландшафтная индикация – это выявление индикаторов, возможно более полный сбор сведений о способах их распознавания на местности и при дешифрировании, раскрытие характера связи между индикатором и индикатом и практическое использование индикаторов (Викторов, Чикишев, 1990). Применение методов ландшафтной индикации обосновано тем, что на специфику фотоизображения (плотность, текстура, цвет) оказывает влияние комплекс факторов, к которым, прежде всего, относятся геологическое строение, рельеф, почвы, растительность и т.д. (Викторов, Чикишев, 1990). Согласно сказанному выше, ландшафтная индикация предполагает использование разнородной пространственной информации о компонентах ландшафта и проведение сопряженной классификации. Поэтому в настоящее время очень важно создавать новые подходы к решению вопросов картографии почв, а разработка алгоритмов для обработки пространственной информации и математико-картографическое моделирование позволяют этот процесс сделать более эффективным.

В представляемой работе рассматривается методика картографирования почв, полностью покрытых растительностью, следовательно, дешифрирование границ почвенных контуров осуществляется по косвенным признакам с использованием методов ландшафтной индикации. Известно, что изменчивость факторов почвообразования (почвообразующие породы, растительность, климат, рельеф) во времени и пространстве обуславливает формирование разнообразных типов почв. Из всех факторов почвообразования, которые можно эффективно исследовать по спутниковым данным и использовать их параметры в качестве индикационных признаков почв, нужно выделить растительность и рельеф, являющиеся наиболее информативными, с одной стороны, а с другой стороны, доступными для дистанционных и подспутниковых исследований. В связи с этим цель настоящего исследования – разработка методики сопряженной обработки спутниковых и лабораторно-полевых данных для картографирования почв.

Сущность методики заключается в расчете и количественной оценке индикационных параметров растительности и рельефа по спутниковым данным и матрицам высот, установлении

статистических связей между химическими свойствами почв и индикационными параметрами, а также в выборе наиболее информативных признаков и составлении классификационных алгоритмов “дерево решений”. Эти алгоритмы позволяют в достаточно короткий срок создавать пространственно-распределенные тематические слои, с последующим объединением полученной пространственной информации в единую цифровую почвенную карту.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследования послужили различные типы и подтипы почв из отдела альфегумусовых (дерново-подбур иллювиально железистый, подбур глееватый, подбур грубогумусированный, дерново-подбур глееватый) и железисто-метаморфических (ржавозем грубогумусированный), а также параметры растительности и рельефа Джулукульской котловины (Республика Алтай). Ключевой участок ограничен координатами  $50^{\circ}28'32.32''$ – $50^{\circ}26'23.03''$  с.ш.,  $89^{\circ}40'18.07''$ – $89^{\circ}43'41.50''$  в.д. По физико-географическому районированию, территория исследования относится к Юго-восточной Алтайской провинции, Джулукульский район (Атлас, 1978).

Изучаемыми параметрами рельефа являлись: крутизна склонов, площадь максимального сбора, горизонтальная кривизна, максимальная кривизна, освещенность. Для территории исследования характерен грядово-холмистый и гривисто-западинный рельеф. Расчет тематических карт морфометрических величин рельефа проводился по матрицам высот поверхности Земли SRTM90 (Shuttle Radar Topography Mission). Алгоритмы расчета морфометрических величин рельефа описаны в работе (Shary et al., 2002).

Изучаемыми параметрами растительности являлись спектрально-яркостные характеристики растительности, выявляемые по многозональным снимкам, и запасы надземной фитомассы, вычисляемые с использованием вегетационного индекса NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Анализ литературы показывает, что значения NDVI, определяемые как отношение яркостей в двух диапазонах снимка (красный и ИК), коррелируют с количеством биомассы растительности (Виноградов, 1984; Кашкин, Сухинин, 2001). Для решения этой задачи находятся взаимосвязи между рассчитанными по спутниковому снимку значениями NDVI и запасами надземной фитомассы растительных сообществ, полученными в полевых условиях.

На ключевом участке были описаны следующие растительные сообщества: осоково-разнотравно-злаковая травянистая тундра; кустарниково-шикшевая ерниковая тундра; кустарниковая ерниковая

тундра; разнотравно-моховая кустарниковая тундра; разнотравно-злаковая кобрезиевая тундра. Определение запасов надземной фитомассы проводилось на площадках  $0.25 \text{ м}^2$  ( $50 \times 50 \text{ см}$ ) методом укосов в четырехкратной повторности (Родин и др., 1968). При этом сроки определения запасов надземной фитомассы в полевых условиях были скоординированы с днем проведения космической съемки, и таким образом было соблюдено условие, заключающееся в одновременном получении информации о состоянии объекта на земле и из космоса. Алгоритм расчета запасов надземной фитомассы описан в работе (Гопп, 2009).

Полевое обследование и описание почв, растительности, рельефа проводилось на ключевых участках и маршрутах, предварительно выделенных на космическом снимке. Выделенные ключевые участки и маршруты наиболее полно охватывают имеющееся разнообразие почв, растительности, рельефа на территории проведения исследований. Основными критериями выбора участков на космическом снимке послужили следующие показатели: различные цветовые (спектральные) и текстурные характеристики объектов исследования и приуроченность к определенным элементам рельефа (возвышенности, депрессии, склоны различной экспозиции и градиента крутизны).

Почвенное картографирование проведено в М 1 : 100000. Территория исследования относится к четвертой категории сложности местности. В общем, заложено и описано пять полнопрофильных почвенных разрезов, 10 полуям и 49 прикопок, что соответствует требованиям почвенной инструкции (Общесоюзная инструкция..., 1973). Описание почв проводилось по новой классификации почв (Шишов и др., 2004).

Исследование физико-химических свойств почв осуществлялось по следующим общепринятым методикам: содержание углерода – методом мокрого сжигания по Тюрину, обменные катионы – по Шолленбергеру (Аринушкина, 1970). Механический состав почв определяли по методу Качинского (Практикум по почвоведению, 1986).

#### *Предварительная обработка данных дистанционного зондирования*

В работе были использованы снимки Landsat 7 ETM+ (разрешение 30 м) – для классификации типов растительных сообществ, SPOT 4 (разрешение 20 м) – для расчета запасов надземной фитомассы, матрица высот SRTM90 (разрешение 90 м) – для расчета морфометрических величин рельефа. Обработка и анализ результатов классификации проводились с помощью пакетов программ: GRASS GIS, ENVI, ГисЭко.

**Атмосферная коррекция.** Спутниковые снимки Landsat 7 ETM+ и SPOT 4 подвергались предва-

рительной атмосферной коррекции в модуле ACM (Atmospheric Correction Module), подмодуль FLAASH (программное обеспечение ENVI). Согласно исследованиям (Verote, Kotchenova, 2008), излучение в красном и ИК-каналах подвержено существенному влиянию атмосферы из-за присутствия различных аэрозолей и водяного пара, которые снижают качество снимков в результате поглощения и рассеивания излучения в атмосфере. Атмосферная коррекция проводится для повышения точности отраженного излучения. Результатом является пересчет измеренных значений к условиям абсолютно прозрачной атмосферы.

**Линейное растяжение по NDVI и расчет оптимальных каналов методом OIF (Optimum Index Factor).** Предложенный метод необходим для снижения признакового пространства с целью улучшения качества классификации спутниковых снимков. Сужение пространства признаков путем отсека непокрываемых растительностью территорий по индексу NDVI и последующее линейное растяжение на весь допустимый диапазон значений яркости позволяют добиться лучших результатов при классификации типов растительности с близкими спектрально-яркостными характеристиками.

Процедура обработки изображения начинается с пороговой сегментации снимка по нормализованному вегетационному индексу

$$\text{NDVI} = \frac{I_{ir} - I_r}{I_{ir} + I_r},$$

где  $I_r$ ,  $I_{ir}$  – значения сигналов, регистрируемые в каналах 3 и 4 соответственно.

Для более наглядного представления гистограммы значения вегетационного индекса преобразовываются к интервалу [0, 255]. Пороговые величины для отсека непокрываемых растительностью территорий (водная поверхность, горные породы, постройки т.п.) определяются пользователем в диалоговом режиме на основе визуального анализа гистограммы значений NDVI. Затем производится линейное растяжение динамических диапазонов значений спектральных признаков на весь допустимый диапазон [0, 255] (Гопп и др., 2007).

После сегментации для всех возможных наборов признаков вычисляется значение OIF (Optimum Index Factor)

$$\text{OIF}(S) = \frac{\sum_{i \in S} \sigma(i)}{\sum_{i \in S} \left( \sum_{j \in S, j > i} |r(i, j)| \right)},$$

где  $S$  – набор каналов;  $\sigma(i)$  – среднеквадратичное отклонение значений спектральных яркостей для  $i$ -го канала;  $r(i, j)$  – коэффициент корреляции значений спектральных яркостей между  $i$ -м и  $j$ -м каналами.

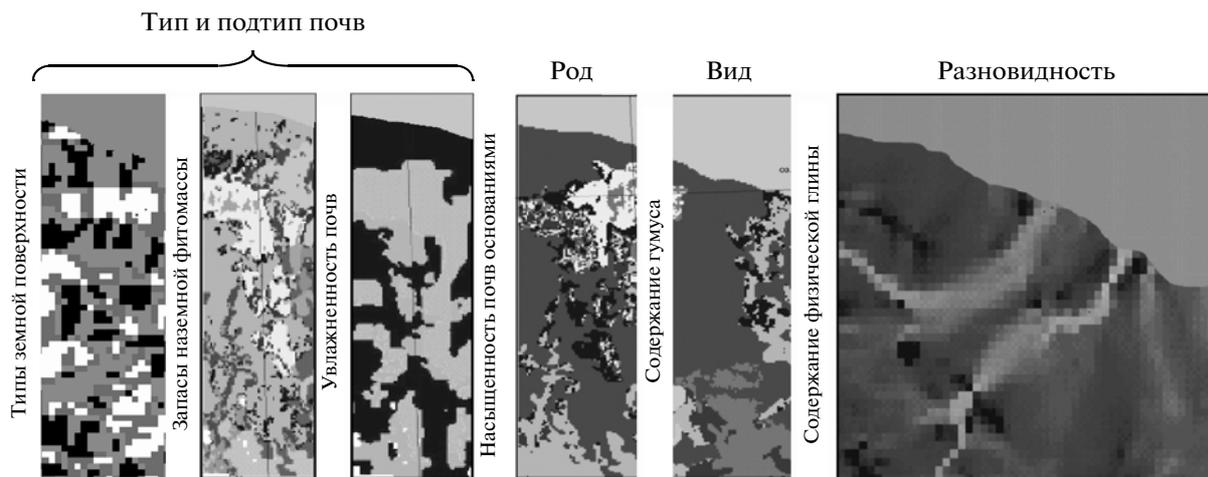


Рис. 1. Тематические слои, используемые в алгоритме (растровое представление данных).

Этот метод был предложен (Chavez et al., 1984) и базируется на алгоритме, который производит поиск комбинации, состоящей из трех каналов, которые между собой имеют наименьшую корреляцию, т.е. максимально не коррелированы, что говорит о высокой информативности этих каналов при последующем проведении классификации снимка. Расчет OIF проводился в программе “GRASS 6.0.0” командной строкой “i.oif” между набором каналов 1, 2, 3, 4, 5 и 7, исключая тепловой ИК-канал 6 и панхроматический канал 8. Затем определяются наборы признаков с наибольшими значениями OIF. Среди них, на основе анализа спектральных откликов растительности, определяется набор признаков, наиболее подходящий для решения конкретной задачи. Таким образом, находятся слабокоррелированные и информативные признаки, которые используются для автоматизированной классификации растительности на снимке с использованием непараметрического алгоритма ССА (Combined Clusterization Algorithm) (Пестунов и др., 2006; Гопп и др., 2007). Обучающая выборка для выделения границ типов растительности на снимке формировалась на основе географически привязанных данных полевых исследований растительности.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Выявление максимально возможного количества индикационных признаков почв, отображаемых на обработанных многозональных снимках и матрицах высот, а также разработка алгоритмов для сопряженной классификации тематических слоев позволяют смоделировать пространственную изменчивость почв на различных таксономических уровнях (тип, подтип, род, вид, разновидность). При этом использование растровой моде-

ли данных обеспечивает быструю и эффективную обработку тематических слоев.

Ключевым моментом методики является создание серии тематических карт с использованием различных данных (наземных, аналитических, спутниковых). Среди рассчитанных тематических карт выявлены наиболее значимые косвенные индикаторы границ почвенных контуров на уровне типа и подтипа почв, к которым относятся: запасы наземной фитомассы, основные типы земной поверхности (холмы, выпуклые склоны, вогнутые склоны, депрессии) и увлажненность (рис. 1). Установлено, что эти признаки могут использоваться только для выявления пространственных границ и не позволяют идентифицировать классификационную принадлежность почв, так как они строго не приурочены к тем или иным разновидностям почв и могут, в свою очередь, встречаться на других территориях, но уже с другими почвами. Классификационную принадлежность почв устанавливают в полевых условиях.

### Слой “Типы земной поверхности”

Расчет карты основных типов земной поверхности (рис. 2) проводился в программе ГисЭко (Shary, 2006) по матрице высот SRTM 90.

Известно, что параметры рельефа влияют на свойства почв и растительности опосредованно, через регулирование факторов среды. В верхних ярусах возвышенностей преобладает снос продуктов выветривания. В нижних ярусах наблюдается аккумуляция материала, принесенного сверху. Для Джулукульской котловины максимальная контрастность процессов сноса и аккумуляции, как функции от действия сил гравитации, обусловливается грядово-холмистым и гривисто-западным рельефом. По мере удаления от областей сноса (холмы, средневыпуклые седловины)

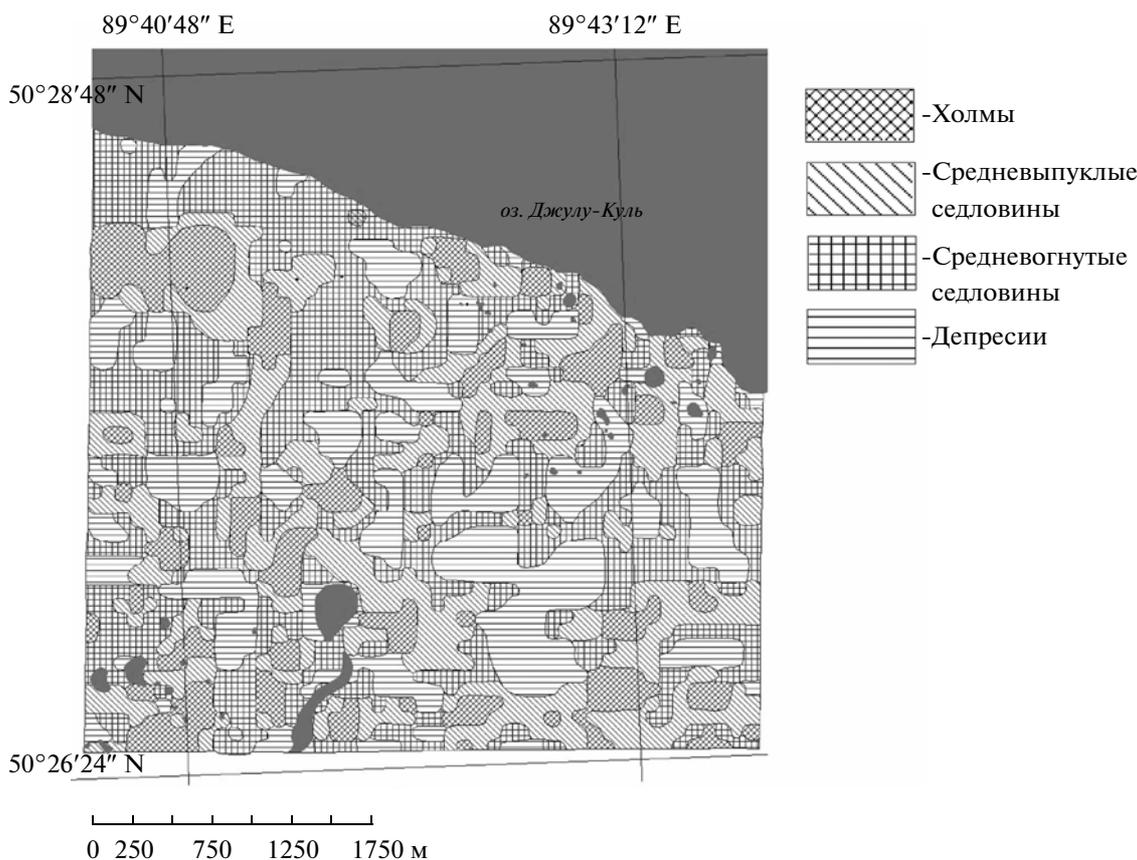


Рис. 2. Карта-схема основных типов земной поверхности.

и приближения к зонам аккумуляции (депрессии, средневогнутые седловины) наблюдается изменение физико-химических параметров почв, при совокупном воздействии грунтовых вод в понижениях изменяется соответственно и видовой состав растений – на мезофильные и гигрофильные виды. В целом для многих параметров почв на изучаемой территории характерна тенденция к изменению показателей в сторону увеличения по мере удаления от областей сноса и приближения к областям аккумуляции (депрессии).

#### Слой “Запасы надземной фитомассы”

Известно, что значительная роль в почвообразовании принадлежит растительности, так как

она является основным поставщиком органических остатков, которые подвергаются последующей минерализации и трансформации в гумусовые вещества почв.

Расчет карты запасов надземной фитомассы проводился по снимку SPOT 4. Для различных растительных сообществ установлены коэффициенты корреляции между значениями запасов надземной фитомассы и вычисленными значениями NDVI по снимку SPOT 4 (табл. 1). Для моделирования пространственной неоднородности запасов надземной фитомассы произведены расчеты уравнений регрессий (табл. 1) и составлен алгоритм (рис. 3), позволяющий автоматизированно построить карту (рис. 4). Также запасы надземной фитомассы используются в качестве крите-

Таблица 1. Зависимость запасов надземной фитомассы от NDVI

Тип растительного сообщества	Коэффициент детерминации	Уравнение регрессии
Осоково-разнотравно-злаковая травянистая тундра	0.95	$y = 13.48x + 9.48$
Кустарниково-шикшевая ерниковая тундра	0.98	$y = 50.85x + 85.01$
Кустарниковая ерниковая тундра	0.86	$y = 106.3x + 161.24$
Разнотравно-моховая кустарниковая тундра	0.94	$y = 42.28x + 99.86$
Разнотравно-злаковая кобрезиевая тундра	0.92	$y = 28.57x + 6.61$

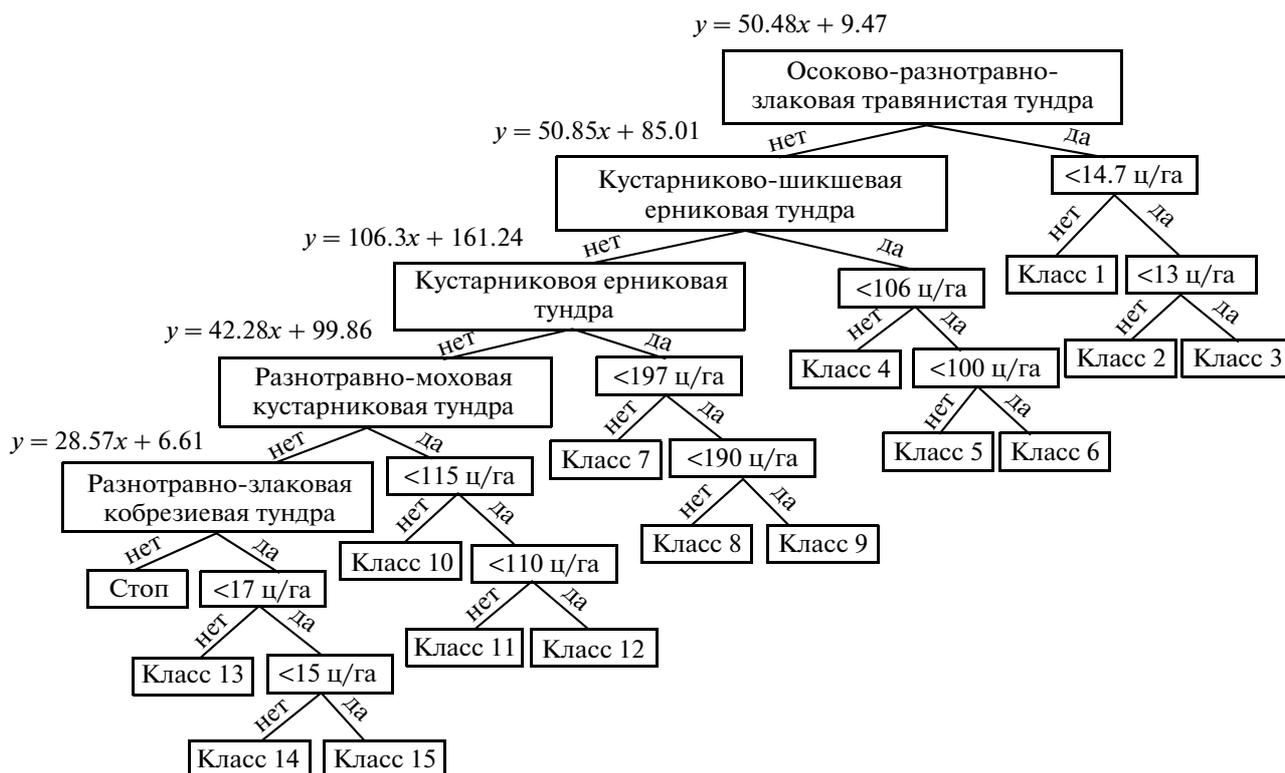


Рис. 3. Схема алгоритма “дерево решений”.

рия оценки некоторых почвенных свойств, где для каждого растительного сообщества установлена прямая корреляция с содержанием органического углерода и степенью насыщенности почвенного поглощающего комплекса основаниями (табл. 2 и 3).

#### Слой “Увлажненность почв”

В связи с тем что растительность не всегда является индикатором тех или иных почв, произведена трансформация ее цифровой карты в карту режима увлажнения согласно шкалам увлажнения Л.Г. Раменского (Раменский, 1938). Ступени увлажнения легко читаются по изменению растительности в порядке любого экологического ряда. К выявленным экологическим группам присваивается количественный показатель (ступень эко-

логического ряда), служащий в дальнейшем как косвенный диагностический признак водного режима почв. По приспособленности растительных сообществ к водному режиму почв на изучаемом ключевом участке установлены три градации: 48 – класс влажно-степного и сухо-лугового увлажнения; 57 – класс влажно-лугового увлажнения; 67 – класс сыро-лугового увлажнения (рис. 5, 6). Поскольку, в основном, перераспределение влаги в почвах происходит благодаря рельефу, то в алгоритм были добавлены данные о типах земной поверхности, которые позволяют сделать более точный прогноз.

#### Слой “Насыщенность почв основаниями”

Род почв, определяемый в изучаемых почвах по степени насыщенности почвенного поглощаю-

Таблица 2. Зависимость степени насыщенности почв основаниями от запасов фитомассы

Тип растительного сообщества	Коэффициент детерминации	Уравнение регрессии
Осоково-разнотравно-злаковая травянистая тундра	0.7	$y = 32.38x - 425.64$
Кустарниково-шикшевая ерниковая тундра	0.73	$y = 2.17x - 189.82$
Кустарниковая ерниковая тундра	0.77	$y = 0.13x + 49.34$
Разнотравно-моховая кустарниковая тундра	0.94	$y = 0.36x + 32.47$
Разнотравно-злаковая кобрезиевая тундра	0.77	$y = 0.99x + 18.35$

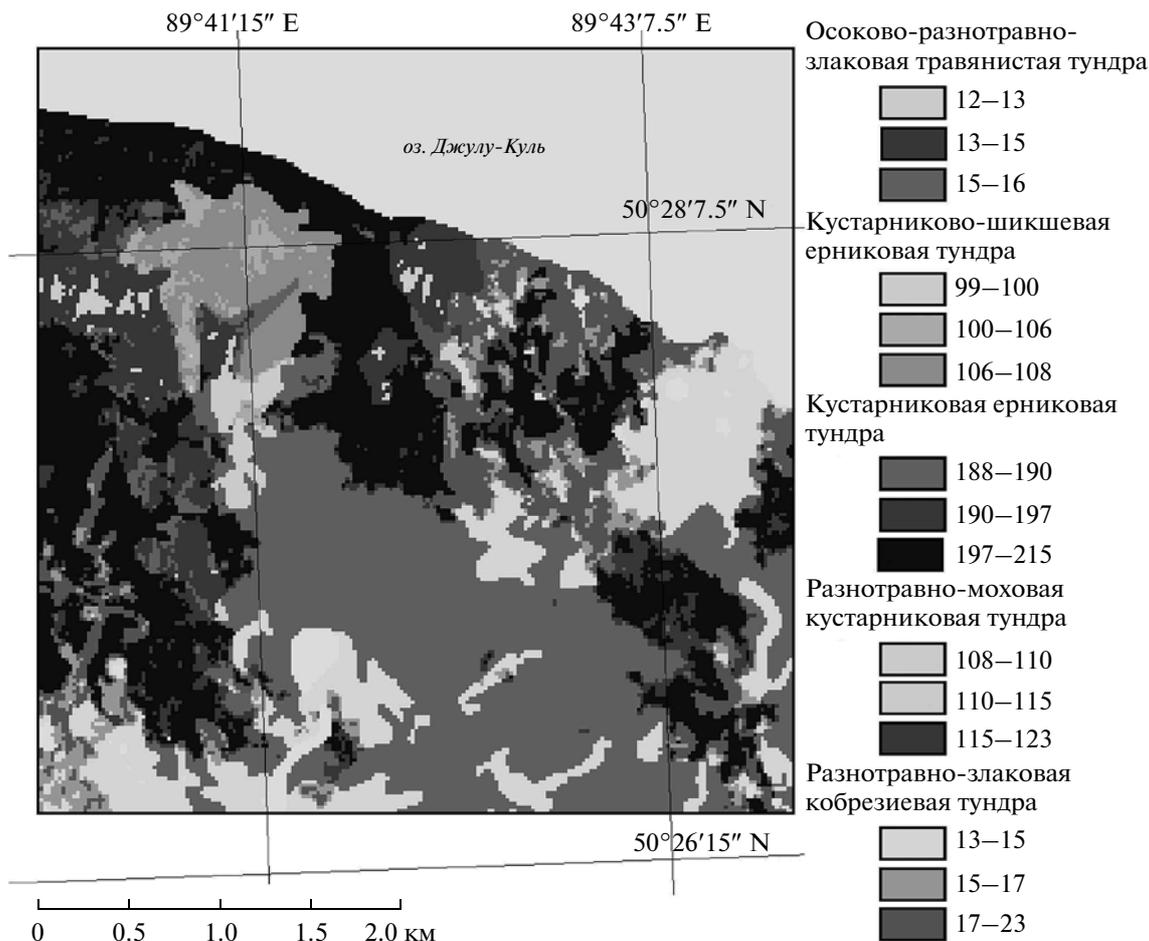


Рис. 4. Запасы надземной фитомассы, ц/га.

щего комплекса основаниями, коррелирует с запасами надземной фитомассы растительных сообществ (табл. 2). Для моделирования пространственной неоднородности свойств почв по степени насыщенности основаниями (определяет род почв) произведены расчеты уравнений регрессий (табл. 2) и составлен алгоритм (рис. 7), позволяющий автоматизированно построить карту степени насыщенности почв основаниями (рис. 8). Таким образом, в результате проведенных расчетов установлено, что предел колебания степени

насыщенности почвенного поглощающего комплекса основаниями на изучаемой территории составляет 30–80%, следовательно, почвенный поглощающий комплекс почв является ненасыщенным.

#### Слой "Содержание гумуса"

Вид почв, определяемый в изучаемых почвах по содержанию гумуса, коррелирует с запасами надземной фитомассы растительных сообществ

Таблица 3. Зависимость содержания гумуса от запасов надземной фитомассы

Тип растительного сообщества	Коэффициент детерминации	Уравнение регрессии
Осоково-разнотравно-злаковая травянистая тундра	0.92	$y = 2.59x - 32.26$
Кустарниково-шикшевая ерниковая тундра	0.95	$y = 0.21x - 13.6$
Кустарниковая ерниковая тундра	0.92	$y = 0.009x + 7.45$
Разнотравно-моховая кустарниковая тундра	0.88	$y = 0.026x + 6.26$
Разнотравно-злаковая кобрезиевая тундра	0.85	$y = 0.11x + 4.06$



Рис. 5. Алгоритм “дерево решений” для составления карты типов растительных сообществ по приспособленности к водному режиму почв.

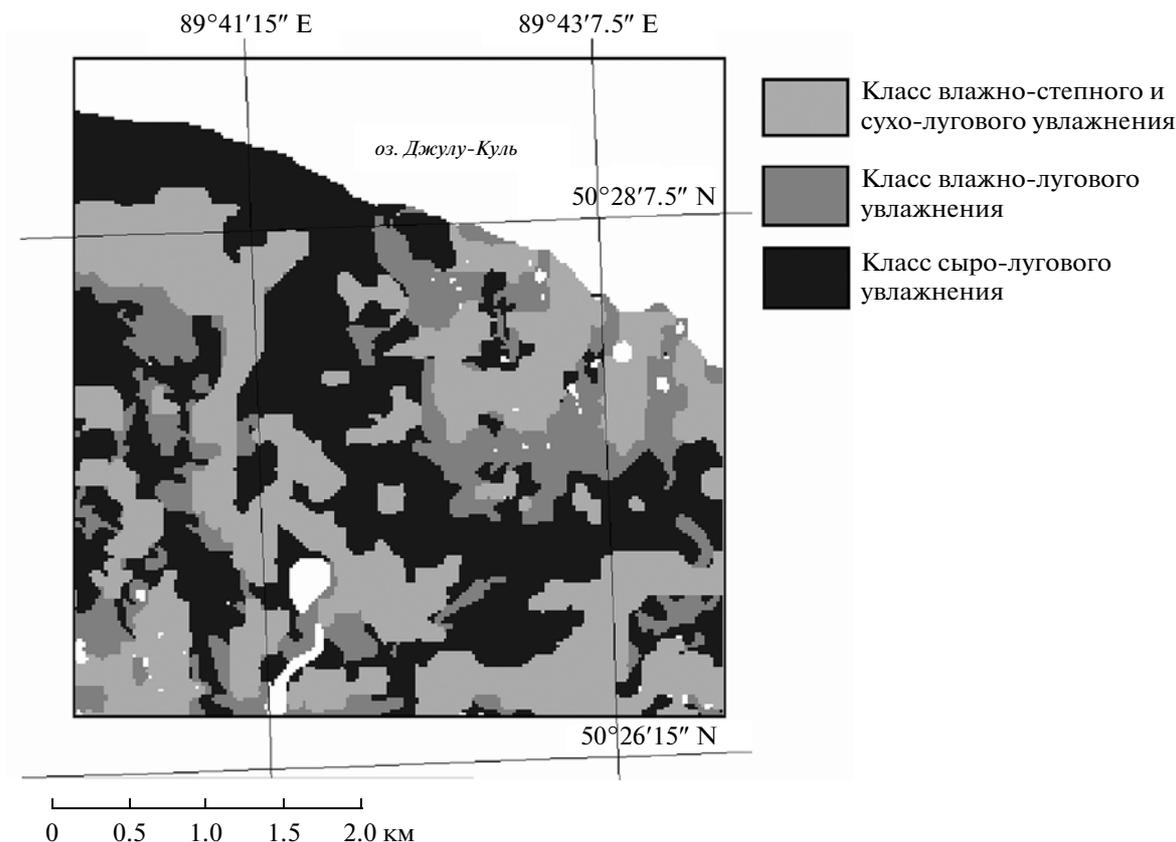
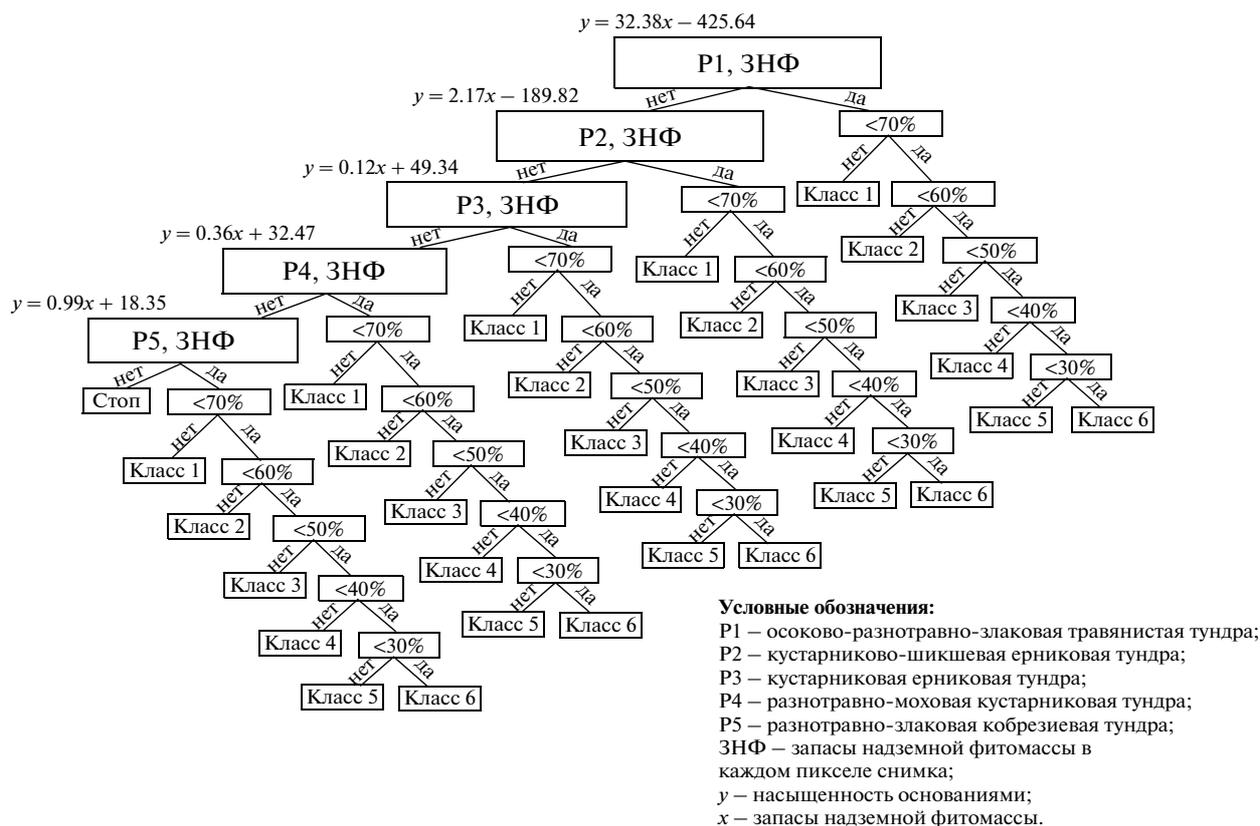


Рис. 6. Карта-схема увлажненности почв.

(табл. 3). Для моделирования пространственной неоднородности свойств почв по содержанию гумуса (определяет вид почв) произведены расчеты

уравнений регрессий (табл. 3) и составлен алгоритм (рис. 9), позволяющий автоматически построить карту содержания гумуса (рис. 10).



**Рис. 7.** Схема алгоритма “дерево решений” для расчета карты степени насыщенности почвенного поглощающего комплекса основаниями.

### Слой “Содержание физической глины”

Разновидность почв, определяемая в изучаемых почвах по содержанию физической глины, коррелирует с параметрами рельефа (табл. 4). В целом, рассматривая корреляцию между параметрами рельефа и содержанием физической глины, обнаруживается, что перераспределение содержания физической глины по элементам рельефа связано также и с процессами поверхностного и внутрпочвенного стока, а не только с вертикальным перемещением вниз по профилю. Для

моделирования пространственной изменчивости содержания физической глины в верхнем горизонте произведен линейный прогноз (рис. 11) по формуле регрессии

$$x = ak_{\max} + bZ + cMCA + d,$$

где  $a = 3.731797$ ,  $b = 0.201934$ ,  $c = 11.758459$ ,  $d = 19.41544$ ;  $x$  – содержание физической глины;  $k_{\max}$  – максимальная кривизна;  $Z$  – высота;  $MCA$  – площадь максимального сбора.

**Таблица 4.** Коэффициенты корреляции Спирмана ( $r_s$ ) между параметрами рельефа и гранулометрическими фракциями образцов почв

Гранулометрические фракции почв (для верхнего горизонта), $n = 25$	Морфометрические величины рельефа					
	$MCA^*$	$F$	$Z$	$k_{\max}^{**}$	$k_h^*$	$GA^*$
Физическая глина	0.86 $p < 0.000001$	нз	-0.44 $p < 0.05$	-0.63 $p < 0.001$	-0.60 $p < 0.01$	-0.55 $p < 0.01$
Физический песок	-0.70 $p < 0.0001$	нз	нз	0.48 $p < 0.05$	0.46 $p < 0.05$	нз

Примечание. \* – Величины, описывающие поверхностный сток; \*\* – величины, описывающие геометрические формы;  $MCA$  – максимальная площадь сбора;  $F$  – освещенность в % (склонение  $35^\circ$ , азимут  $180^\circ$ );  $Z$  – высота;  $k_{\max}$  – максимальная кривизна;  $k_h$  – горизонтальная кривизна;  $GA$  – крутизна склонов;  $p$  – уровень значимости;  $n$  – количество почвенных проб; нз – незначимое значение.

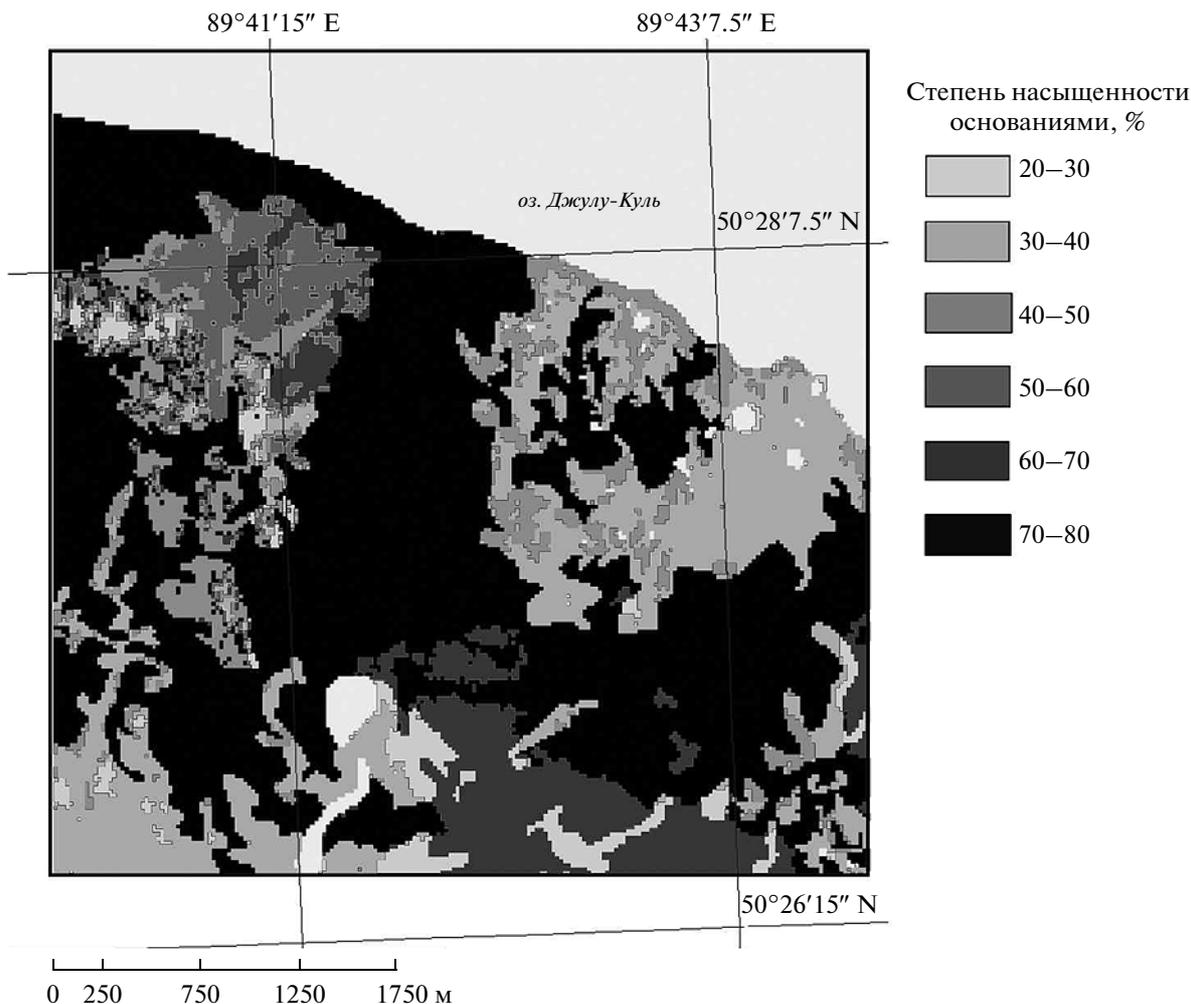
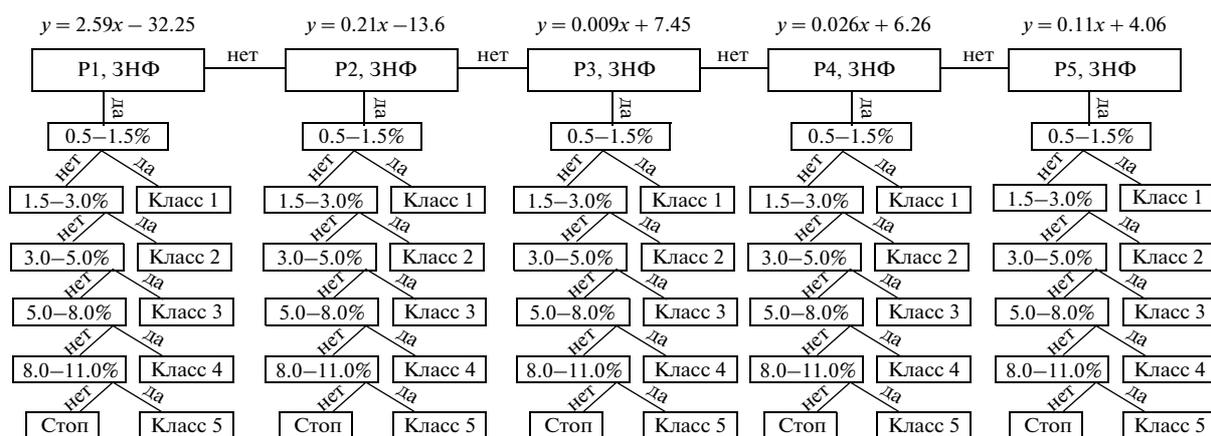


Рис. 8. Карта-схема степени насыщенности почв основаниями.



Условные обозначения: P1 – осоково-разнотравно-злаковая травянистая тундра; P2 – кустарниково-шикшевая ерниковая тундра; P3 – кустарниковая ерниковая тундра; P4 – разнотравно-моховая кустарниковая тундра; P5 – разнотравно-злаковая кобрезиевая тундра; ЗНФ – запасы надземной фитомассы в каждом пикселе снимка; y – содержание органического углерода, %; x – запасы надземной фитомассы.

Рис. 9. Схема алгоритма “дерево решений” для расчета карты содержания гумуса.

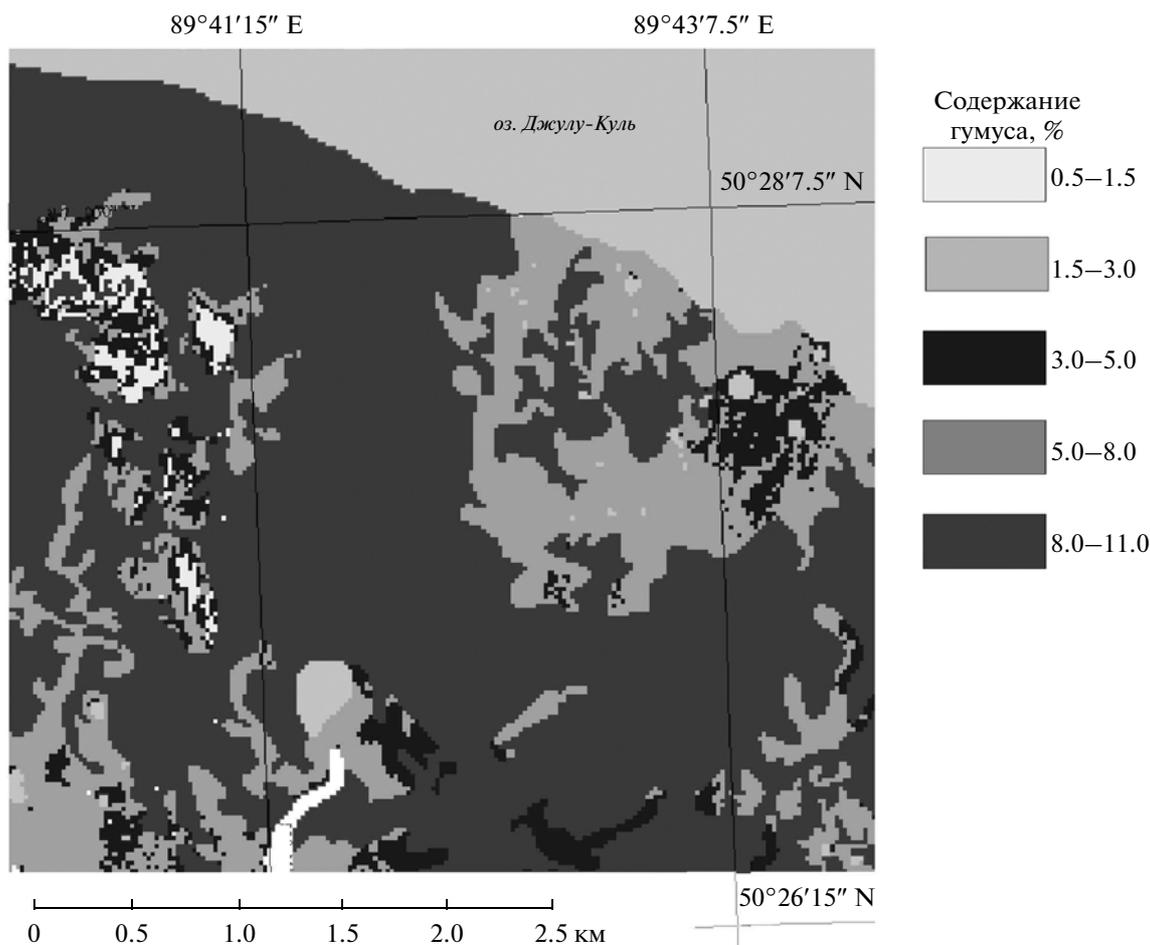


Рис. 10. Карта-схема содержания гумуса.

Для характеристики разряда почв была использована цифровая карта четвертичных отложений Джулукульской котловины. На изучаемой территории распространены два типа: озерно-моренные отложения и элюво-делювий коренных пород.

На следующем этапе полученная серия тематических карт используется в алгоритме “дерево решений” (рис. 12), который позволяет автоматически выделить географические ареалы почв согласно заданным условиям. Входные данные для алгоритма получают в процессе проведения полевых, дистанционных, аналитических и статистических исследований параметров почв, растительности и рельефа. К отличительным особенностям данного алгоритма можно отнести возможность его редактирования при привлечении новых дешифровочных признаков с последующей автоматической корректировкой карты. Разработанный алгоритм обеспечивает частичную замену ручного труда при составлении почвенных

карт. Результаты работы алгоритма представлены на рис. 13.

Для оценки точности выделенных географических ареалов почв использовалась контрольная почвенная карта, составленная классическим ручным способом. Качественная оценка результатов сопряженной классификации тематических слоев на уровне типа и подтипа почв производилась на основе матрицы погрешностей. Согласно матрице погрешностей (табл. 5) из 37537 пикселей правильно были идентифицированы 35227. Таким образом, общая точность классификации для всей карты составляет 93.8%, что больше порогового значения 85%, поэтому результаты классификации следует признать удовлетворительными. Недиагональные элементы матрицы (табл. 5) содержат информацию о ложной классификации (информация в столбцах) и пропусках (информация в строках). Ошибки пропусков классификации и ложной классификации представлены в табл. 6.

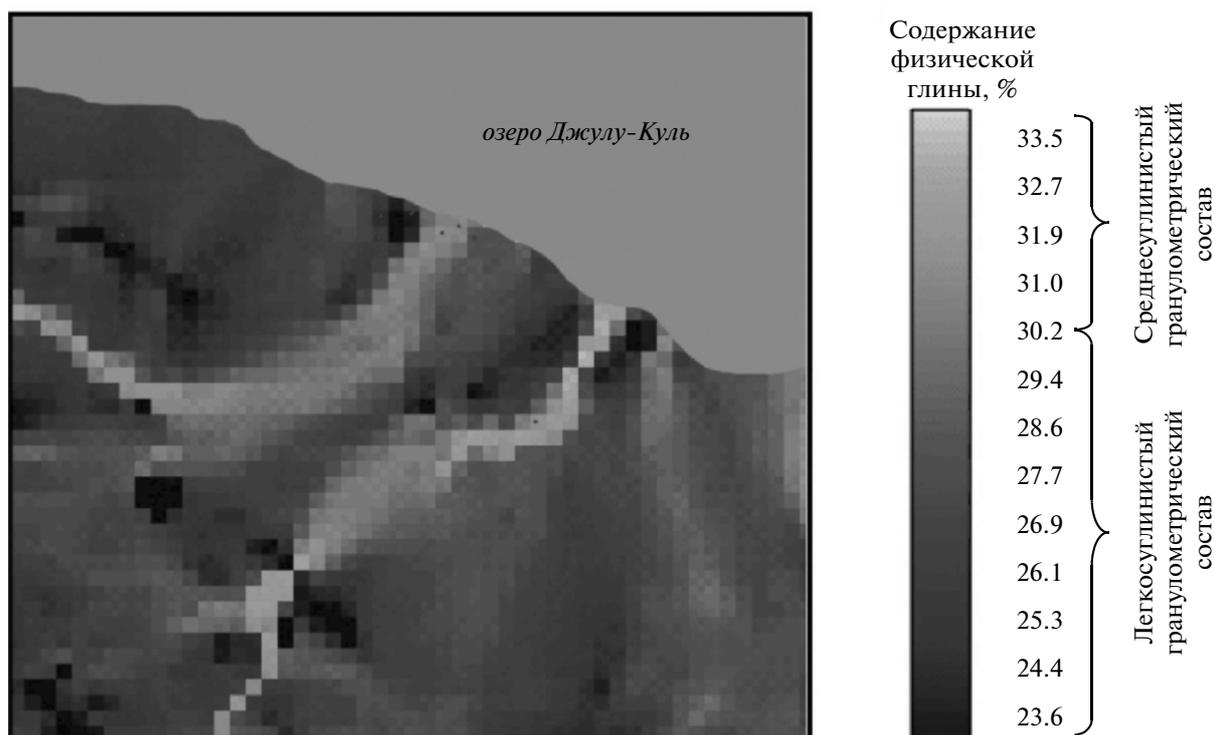


Рис. 11. Карта-схема содержания физической глины в верхнем горизонте.

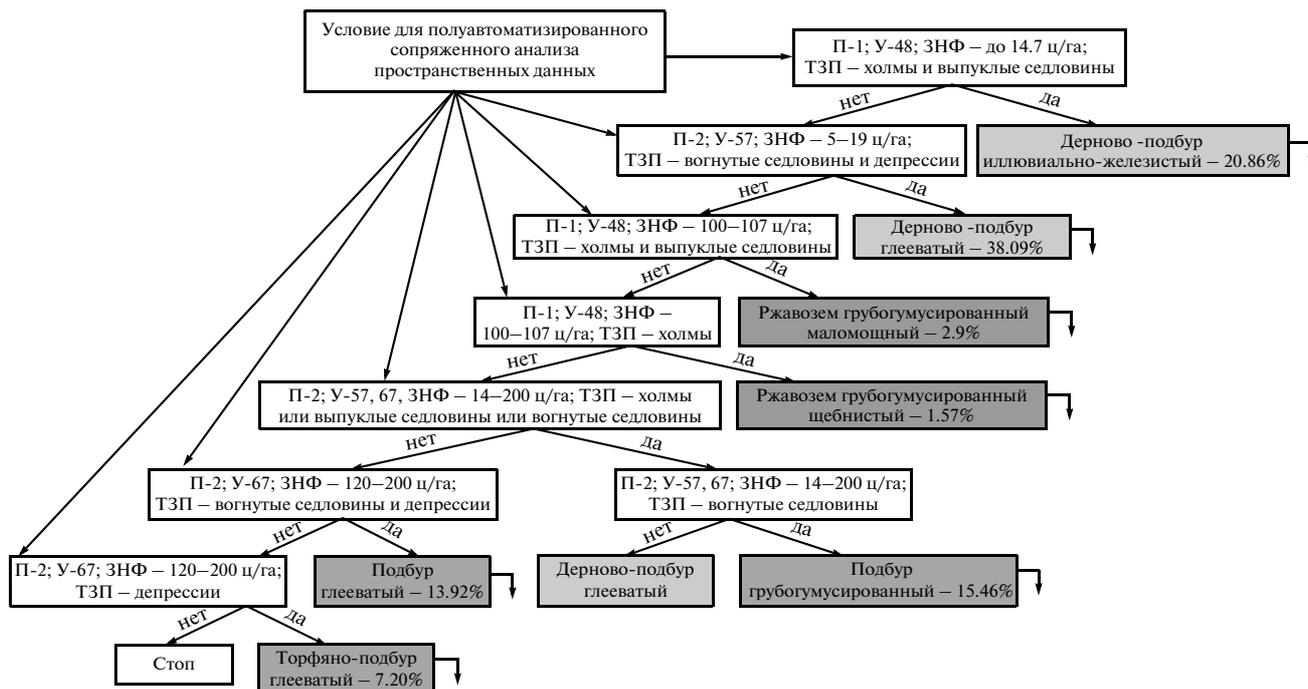
При использовании порогового значения 85% и данных табл. 7 видно, что все классы соответствуют заданному критерию, так как все гранич-

ные значения доверительного интервала больше 85%. Таким образом, используемые тематические слои и обучающие правила в алгоритме “дерев

Таблица 5. Матрица ошибок классификации

Фактический класс на контрольной карте	Расчетный класс на анализируемой карте						Всего для контрольной карты
	ПБд <sup>ИЖ</sup>	ПБд <sup>Г</sup>	ПБ <sup>ГР</sup>	ПБ <sup>Г</sup>	ПБт <sup>ИЖ</sup>	РЖ <sup>ГР</sup>	
ПБд <sup>ИЖ</sup>	<b>3600</b>	195	53	30	0	9	3887
ПБд <sup>Г</sup>	211	<b>16913</b>	90	226	300	160	17900
ПБ <sup>ГР</sup>	0	134	<b>3340</b>	57	28	0	3559
ПБ <sup>Г</sup>	0	187	121	<b>5665</b>	20	0	5993
ПБт <sup>ИЖ</sup>	0	219	0	144	<b>3848</b>	0	4211
РЖ <sup>ГР</sup>	87	39	0	0	0	<b>1861</b>	1987
Всего для анализируемой карты	3898	17687	3604	6122	4196	2030	<b>35227</b>

Примечание. Для табл. 5–7: ПБд<sup>ИЖ</sup> – дерново-подбур иллювиально-железистый; ПБд<sup>Г</sup> – дерново-подбур глееватый; ПБ<sup>ГР</sup> – подбур грубогумусированный; ПБ<sup>Г</sup> – подбур глееватый; ПБт<sup>ИЖ</sup> – торфяно-подбур глеевый иллювиально-железистый; РЖ<sup>ГР</sup> – ржавозем грубогумусированный.



**Условные обозначения:**

- П-1 – элювий и делювий коренных пород;
- П-2 – озерно-моренные отложения;
- ЗНФ – запасы надземной фитомассы;
- ТЗП – типы земной поверхности
- У – увлажненность (48 – класс влажно степного и сухо-лугового увлажнения; 57 – класс влажно-лугового увлажнения; 67 – класс сыро-лугового увлажнения).
- ↘ – переход к тематическим слоям, характеризующим степень насыщенности почв основаниями (род почв), содержание гумуса (вид почв), содержание физической глины (разновидность почв), тип почвообразующих пород (разряд почв).

Рис. 12. Схема алгоритма “дерево решений”.

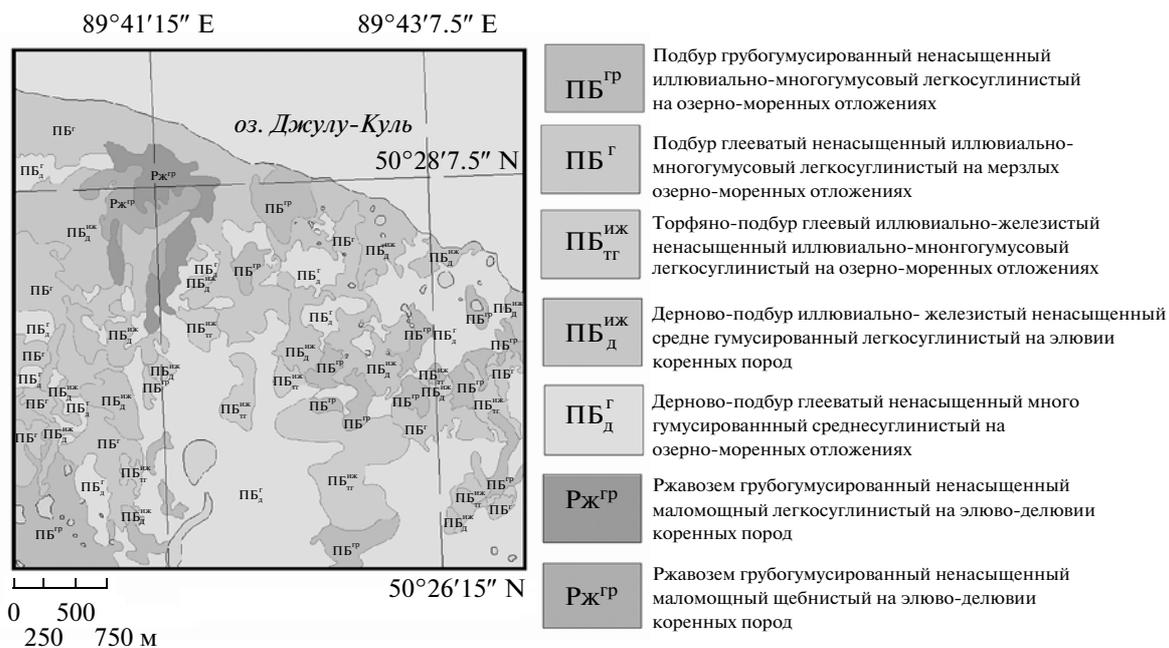


Рис. 13. Почвенная карта, построенная алгоритмом “дерево решений”.

**Таблица 6.** Ошибки, связанные с ложной классификацией и пропусками классификации

Класс	Пропуск			Ложная классификация		
	Пропущенные пиксели	Общее кол-во пикселей	Процент ошибок	Ложная классификация	Общее кол-во пикселей	Процент ошибок
ПБд <sup>ИЖ</sup>	287	3887	7.3	298	3898	7.6
ПБд <sup>Г</sup>	987	17900	5.5	774	17687	4.3
ПБ <sup>ГР</sup>	219	3559	6.1	264	3604	7.3
ПБ <sup>Г</sup>	328	5993	5.4	457	6122	7.9
ПБт <sup>ИЖ</sup>	363	4211	8.6	348	4196	8.2
РЖ <sup>ГР</sup>	126	1987	6.3	169	2030	8.3

**Таблица 7.** Доверительные интервалы для пропусков и ложной классификации

Класс	Пропуски				Ложная классификация		
	Правильная классификация	Размер выборки	% попаданий	95%-ный доверительный интервал	Размер выборки	% попаданий	95%-ный доверительный интервал
ПБд <sup>ИЖ</sup>	3600	3887	92.6	93.0–94.5	3898	92.4	93.0–94.6
ПБд <sup>Г</sup>	16913	17900	94.5	93.4–94.1	17687	95.6	93.4–94.1
ПБ <sup>ГР</sup>	3340	3559	93.9	92.9–94.6	3604	92.7	92.9–94.6
ПБ <sup>Г</sup>	5665	5993	94.5	93.2–94.4	6122	92.5	93.2–94.4
ПБт <sup>ИЖ</sup>	3848	4211	91.4	93.0–94.6	4196	91.7	93.0–94.6
РЖ <sup>ГР</sup>	1861	1987	93.7	92.7–94.9	2030	91.7	92.7–94.9

решений” содержат в себе достаточно информации для правильного распределения пикселей по классам.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследований позволяют сделать следующие выводы.

1. Разработана и апробирована методика картографирования почв, полностью покрытых растительностью, с использованием спутниковых и лабораторно-полевых данных, а также матриц высот поверхности Земли.

2. Выявлены наиболее значимые косвенные индикаторные признаки для установления географических ареалов почв на уровне типа и под-типа, к которым относятся: запасы надземной фитомассы, основные типы земной поверхности, увлажненность. Установлено, что эти признаки могут использоваться только для выявления пространственных границ и не позволяют идентифицировать классификационную принадлежность почв, так как они строго не приурочены к тем или иным разновидностям и могут в свою очередь встречаться на других территориях, но уже с другими почвами.

3. Выявлена зависимость между количественными параметрами почв, характеризующими род

(по степени насыщенности основаниями) и вид (по содержанию гумуса) с запасами надземной фитомассы. Выявлена зависимость между содержанием физической глины (характеризует разновидность почв) и параметрами рельефа (максимальная кривизна, высота, площадь максимального сбора). Рассчитаны уравнения регрессий и соответствующие тематические карты.

4. Разработан алгоритм “дерево решений” для сопряженной классификации результатов обработки многозональных снимков и матриц высот поверхности Земли, позволяющий выделять ареалы почв с определенным сочетанием признаков из разных тематических слоев, параметры которых соответствуют заданным экспертом условиям.

5. По результатам сравнения контрольной карты с выделенными географическими ареалами почв алгоритмом “дерево решений” можно судить об удовлетворительной точности классификации. Таким образом, используемые тематические слои и обучающие правила в алгоритме “дерево решений” содержат в себе достаточно информации для правильного распределения пикселей по классам.

Работа выполнена в рамках проекта “Мониторинг и оценка почвенных ресурсов Западной Сибири” VI.44.1.13.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аринушкина Е.В.* Руководство по химическому анализу почв. М.: МГУ, 1970. 487 с.
- Атлас. Алтайский край. М.-Барнаул: ГУГК при СМ СССР, 1978. 222 с.
- Виноградов Б.В.* Аэрокосмический мониторинг экосистем. М.: Наука, 1984. 320 с.
- Викторов С.В., Чикишев А.Г.* Ландшафтная индикация и ее практическое применение. М.: МГУ, 1990. 198 с.
- Гопп Н.В.* Моделирование запасов надземной фитомассы тундровых сообществ растений с использованием наземных и спутниковых данных // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2009. Вып. 18. С. 200–206.
- Гопп Н.В., Куликова Е.А., Пестунов И.А., Синявский Ю.Н., Смирнов В.В.* Распознавание формаций лесной растительности с близкими спектрально-яркостными характеристиками по данным съемки со спутника LANDSAT 7 ETM+ // Вычислительные технологии. 2007. Т. 12. № 2. С. 194–201.
- Кашкин В.Б., Сухинин А.И.* Дистанционное зондирование Земли из космоса. Цифровая обработка изображений. М.: Логос, 2001. 264 с.
- Общесоюзная инструкция по почвенным обследованиям и составлению крупномасштабных почвенных карт землепользований / Под ред. Т.А. Ищенко. М.: Колос, 1973. 95 с.
- Пестунов И.А., Будкина Е.А., Синявский Ю.Н.* Алгоритм кластеризации многоспектральных изображений на основе формирования сеточной структуры в пространстве признаков // Вычислительные и информационные технологии в науке, технике и образовании. Павлодар, 2006. Т. 2. С. 124–131.
- Почвенная съемка / Руководство по полевым исследованиям и картированию почв / Под ред. И.В. Тюрина, И.П. Герасимова, Е.Н. Иванова, В.А. Носина. М.: Изд-во АН СССР, 1959. 348 с.
- Практикум по почвоведению / Под ред. И.С. Кауричева. М.: Агропромиздат, 1986. 336 с.
- Раменский Л.Г.* Введение в комплексное почвенно-геоботаническое исследование земель. М.: Сельхозгиз, 1938. 620 с.
- Родин Л.Е., Ремезов Н.П., Базилевич Н.И.* Методические указания к изучению динамики и биологического круговорота в фитоценозах. Л.: Наука, 1968. 143 с.
- Шишов Л.Л., Тонконогов В.Д., Лебедева И.И., Герасимова М.И.* Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
- Chavez P.S., Berlin G.L., Sowers L.B.* Statistical method for selecting Landsat MSS ratios // J. Appl. Photograph. Engin. 1984. V. 8. P. 23–30.
- Personal research website on geomorphometry and applications / Shary P.A. 2006. Electronic resource [www.giseco.info/](http://www.giseco.info/)
- Shary P.A., Sharaya L.S., Mitusov A.V.* Fundamental quantitative methods of land surface analysis // Geoderma. 2002. V. 107. № 1–2. P. 1–32.
- Vermote E.F., Kotchenova S.* Atmospheric correction for the monitoring of land surfaces // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. № D23S90. P. 1–12. doi:10.1029/2007JD009662.

## Algorithms of Decision-Making for the Automated Drawing up of Digital Soil Maps on the Basis of Land, Analytical and Satellite Data

N. V. Gopp

*Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk*

The paper deals with the technology of drawing up of digital soil maps with use of parameters of vegetation and a relief. These parameters are calculated by satellite data (Landsat ETM+, SPOT 4) and matrix of heights of a surface of Earth (SRTM90). By the example of test plot, the possibility of effective application of analytical, land and satellite data has been shown for interpretation areas of soils on indirect signs.

**Keywords:** mapping of soils, remote sensing, digital soil cartography