

# АКТУАЛИЗАЦИЯ ЛАНДШАФТНОЙ КАРТЫ ПИНЕЖСКОГО ЗАПОВЕДНИКА МЕТОДАМИ МНОГОМЕРНОГО АНАЛИЗА

С. Ю. Попов

*Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова*

*E-mail: s\_yu\_popov@rambler.ru*

Поступила в редакцию 22.01.2016

В статье рассматривается цикл работ по актуализации ландшафтной карты Пинежского заповедника. Для актуализации пространственной информации использовался дискриминантный анализ, точность которого составила 90.2%. Приводится подробный разбор качества анализа. При актуализации удалось выделить два новых ландшафта. Актуализированная ландшафтная карта Пинежского заповедника имеет более точные границы и может использоваться для дальнейших исследований на современном уровне.

**Ключевые слова:** ландшафтная карта, ГИС-технологии, Landsat, цифровая модель рельефа, дискриминантный анализ.

Государственный природный заповедник «Пинежский» расположен в Пинежском районе Архангельской области. Он был образован в 1974 году. Площадь его составляет 518.07 км<sup>2</sup>. Его территория расположена на юго-восточной окраине Беломоро-Кулойского плато (БКП), которое сложено карстующимися гипсовыми породами палеозоя, перекрытыми сверху слоем морены Валдайского оледенения. Поэтому современное ландшафтное строение территории определяется как действием ледниковых покровов в прошлом, так и протекающими карстовыми процессами (Шаврина, Малков, 2000).

Ландшафтные исследования проводились на этой территории еще до создания заповедника Д.Н. Сабуровым (1972). Этот автор изучал довольно обширный район, включающий южную часть БКП и западную часть Мезенской равнины – Среднее Пинежье. Впоследствии, ландшафтные исследования проводились коллективом научных сотрудников заповедника (Структура и динамика..., 2000). Ими была разработана ландшафтная карта, природно-территориальные комплексы которой выделялись на принципах морфолого-структурной классификации В.Н. Андрейчука (1992), хорошо отражающей специфику карстовых ландшафтов (Структура и динамика..., 2000). На основе ландшафтного районирования Д.Н. Сабурова (1972, 1988) и классификации В.Н. Андрейчука (Андрейчук, 1992) А.М. Рыковым (1999) была отрисована карта ландшафтов Пинежского заповедника (рис. 1).

На этой карте получили отображение следующие ландшафты: ледниковый с элементами карста (ЛЭК), карстово-ледниковый (КЛ), карстогенный (КГ), пластово-денудационный с элементами карста (ПД) (Структура и динамика..., 2000).

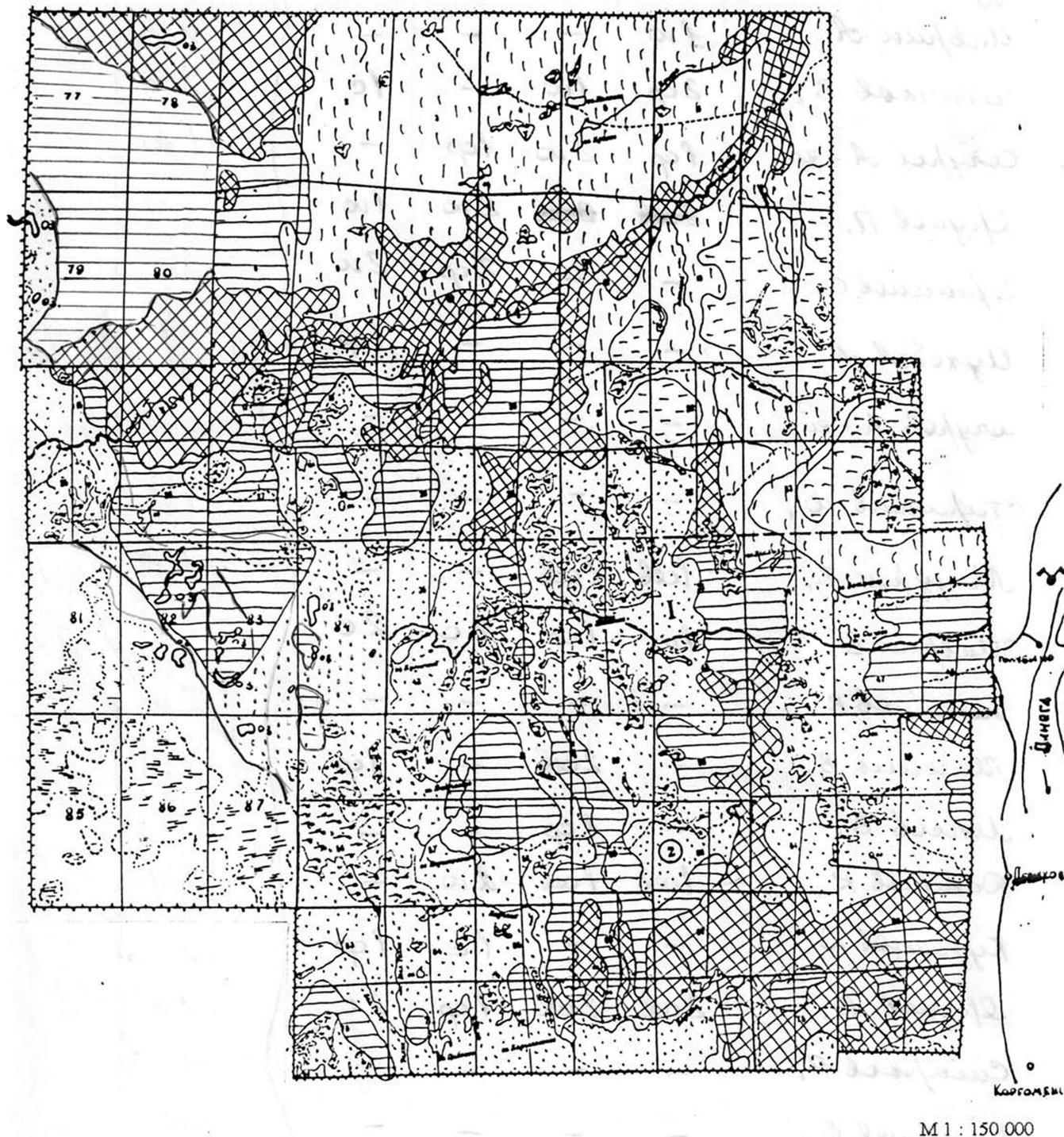
## **Краткая характеристика ландшафтов.**

*Ледниковый с элементами карста (ЛЭК)* представляет собой более или менее плоскую по-

верхность, сформированную моренными отложениями последней стадии оледенения валдайского ледника (Шаврина, Малков, 2000). Плащ морены здесь разной мощности – от нескольких метров в центральной части заповедника до нескольких десятков метров в юго-западной части. Плащ морены покрывает карстующиеся гипсовые породы, поэтому местами здесь встречаются редкие карстовые воронки разного размера. Водораздельные пространства этого ландшафта сильно заболочены, поэтому в нем распространены долгомошные и сфагновые еловые, сосновые и березовые леса, а также болота: верховые с грядово-мочажинным комплексом в крупных депрессиях рельефа и переходные – в небольших депрессиях водно-ледникового происхождения и в карстовых воронках. Около половины площади данного ландшафта занимают ельники черничные.

*Карстово-ледниковый ландшафт (КЛ)* характеризуется сочетанием карстовых и ледниковых форм рельефа. В некоторых местах плотность карстовых воронок доходит до 400–1500 шт/км<sup>2</sup> (Рыков, Рыкова, 2000). Поэтому рельеф здесь пересеченный, а местообитания хорошо дренированы и заболоченность небольшая. Здесь можно наблюдать иногда переходные ключевые болота по карстовым воронкам. В связи с сочетанием плоских форм моренного рельефа и просадочных форм карстового рельефа, в растительном покрове данного ландшафта сочетаются ельники черничные (характерные для дренированных участков моренного рельефа) и сосняки мелкотравно-черничные. Поскольку КЛ сильно дренирован, в прошлом на его территории периодически возникали пожары. На местах старых гарей (80–150-летней давности) ныне произрастают сосняки, березняки и лиственничники разнотравные.

*Карстогенный ландшафт (КГ)* включает участки карстовых логов и прибортовой зоны долины р. Сотки, где активно протекающие кар-



М 1 : 150 000

-  Карстогенный
-  Закарстованный, карстово-ледниковый
-  Ледниковый с элементами карста
-  Пластово-денудационный с элементами карста (сильно расчлененный)
-  Пластово-денудационный с элементами карста (слабо расчлененный)

Рис. 1. Ландшафтная карта Пинежского заповедника (по: Рыков, 1999; Рыков, Рыкова, 2000).

Fig. 1. Map of landscapes of the Pinega State Reserve by Rykov, 1999; Rykov, Rykova, 2000.

стовые процессы приводят к формированию шепняковых полей, карстовых цирков, карстовых рвов (Малков, Шаврина, 2008; Шаврина, Малков, 2008). Здесь выходят на поверхность (или пере-

крыты слоем морены мощностью в первые десятки сантиметров) гипсовые породы. Растительность в таких условиях представлена березняками и ельниками аконитовыми и разнотравными,

лиственничниками разнотравными, высокотравными лугами по днищам карстовых логов.

*Пластово-денудационный ландшафт (ПД)*, также как и ЛЭК, представляет плоскую равнину, но огипсованные породы здесь перекрыты слоем красноцветных песчаников (Рыков, Рыкова, 2000). Основная поверхность ПД на несколько десятков метров возвышена над поверхностью ЛЭК, поэтому здесь развиты денудационные процессы, выражающиеся в формировании оврагов и карстовых воронок. Здесь также как в КЛ, сочетается растительность моренных и карстовых форм рельефа. В отличие от КЛ, моренные формы здесь преобладают, поэтому в растительном покрове получают значительное распространение ельники черничные и болота.

К этой, вполне логичной схеме членения территории на ландшафты, можно сделать дополнения. Так, на наш взгляд, долину р. Сотки можно было бы выделить как отдельный ландшафт. В качестве обоснования можно привести следующие доводы: местообитания в долине сотки сформированы благодаря действию не столько карстовых, сколько аллювиальных процессов, здесь формируются аллювиальные формы мезорельефа (сложенные аллювиальными же породами) и произрастают ельники и березняки широколиственные. Кроме того, анализ рельефа и космоснимков показывает, что юго-восточный угол заповедника, отнесенный на карте А.М. Рыкова (1999) к карстово-ледниковому и карстогенному ландшафтам

(рис. 1), попадает на коренной склон долины реки Пинеги (рис. 2, 3). В связи с этим, данная территория также должна рассматриваться как отдельный ландшафт.

Таким образом, в настоящей работе предлагается следующее ландшафтное деление территории:

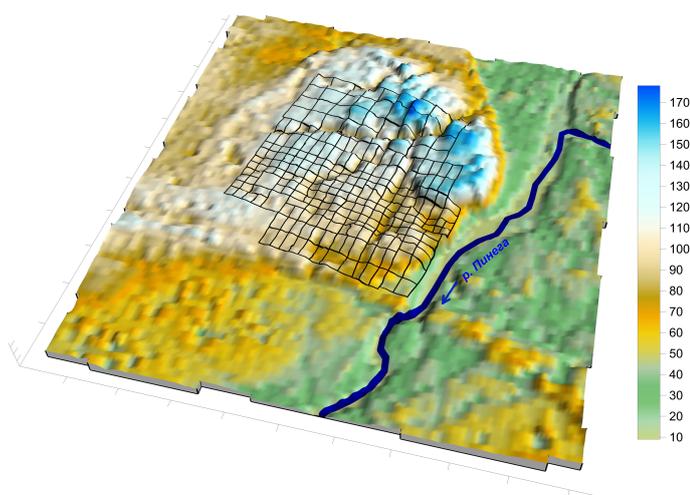
- Ледниковый с элементами карста (ЛЭК);
- Карстово-ледниковый (КЛ);
- Карстогенный (КГ);
- Пластово-денудационный (ПД);
- Долина р. Сотки (Д);
- Склон коренного берега р. Пинеги (СКБ).

Можно дать следующую характеристику вновь выделенным ландшафтам.

*Долинный ландшафт р. Сотки (Д)* включает в себя пойму реки Сотки с луговой и прибрежно-водной растительностью низкой поймы и широколиственными лесами высокой поймы, склоны коренных берегов с ельниками мелкотравно-черничными и участки 1 террасы с разнотравными березняками и ельниками.

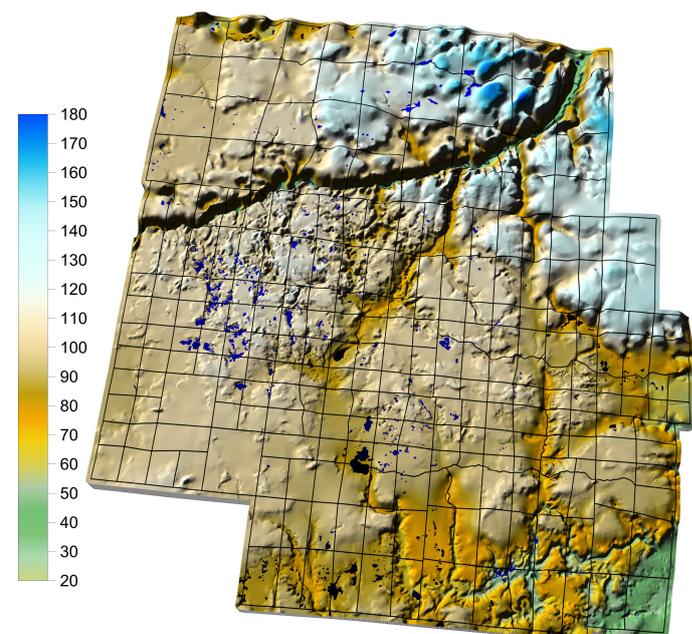
*Склон коренного берега р. Пинеги (СКБ)* характеризуется общей покатостью рельефа в сторону р. Пинеги и сочетанием растительности моренных равнин (ельников черничных) с растительностью карстово-ледникового ландшафта (ельников разнотравных).

Учитывая схематичность ранее составленной ландшафтной карты (рис. 1), мы решили провести ее актуализацию с применением современ-



**Рис. 2.** Цифровая модель рельефа юго-восточной части БКП с квартальной сеткой заповедника.

**Fig. 2.** Digital elevation model of south-eastern part of the Belomoro-Kuloiskoe Plateau with the quadrant net of the Pinega State Reserve.



**Рис. 3.** Цифровая модель рельефа территории заповедника (шкала слева – абсолютная высота, м н. у. м.)

**Fig. 3.** Digital elevation model of the Pinega State Reserve (scale – altitude, m)

ных методов обработки данных дистанционного зондирования.

### Материалы и методы

В качестве материальной основы для актуализации ландшафтной карты Пинежского заповедника использовались:

1. Снимки Landsat 5 за 17 июня 1988 и 21 июня 2001 года. Подбор снимков за эти даты обусловлен тем, что в 2004 г. на территории заповедника произошел крупный пожар, поэтому гарь, 2004 г., занимающая ныне около 4% площади заповедника (Попов, Пучнина, 2012), на более поздних снимках дает сильную ошибку при дешифрировании ландшафтного покрова. В связи с этим, из архива USGS были подобраны два ближайших по дате безоблачных снимка, сделанных до пожара 2004 г.

2. Цифровая модель рельефа, составленная путем оцифровки горизонталей топографических карт масштаба 1 : 25 000, на основе которой созданы GRID-покрытия для 7 характеристик рельефа: абсолютная высота, экспозиция склонов, уклон поверхности, общая кривизна, плановая кривизна, профильная кривизна, освещенность рельефа с юго-востока при высоте солнца 45°. GRID-покрытия создавались с точностью 15 м в 1 пикселе.

3. Ландшафтная карта заповедника (рис. 1) использовалась для создания полигонального слоя обучающей выборки для составления пространственной модели. Контура этой карты использовались для создания полигонов обучающей выборки для ландшафтов КЛ, ЛЭК, КГ и ПД. Для вновь выделенных ландшафтов Д и СКБ полигоны отрисовывались по цифровой модели рельефа и космоснимкам.

В качестве концептуальной основы для актуализации ландшафтной карты использовалась методика классификации мультizonальных изображений методом пошагового дискриминантного анализа (ПДА), которая хорошо оправдала себя при актуализации старых тематических карт по снимкам Landsat (Пузаченко, 2004; Кренке, 2011).

Для построения пространственной базы данных использовалось 7 каналов Landsat 5: b1, b2, b3, b4, b5, b6, b7. Первые три – каналы видимого спектра, b4, b5 и b7 – ближний, средний и дальний инфракрасный с разрешением 30 м в 1 пикселе, b6 – тепловой с разрешением 60 м в 1 пикселе. Физические характеристики каналов приводятся в табл. 1. Кроме значений яркостей первых семи каналов, рассчитывались спектраль-

ные индексы (Кренке, Пузаченко, 2008). Для каждого снимка Landsat были рассчитаны следующие индексы:

$NDVI = (B4 - B3) / (B4 + B3)$  – Нормализованный разностный индекс растительности – чистая продукция, транспирация;

$RVI = b4 / b3$  (относительный индекс растительности) – различные типы растительности с различной биомассой;

$DVI = b4 - b3$  – разностный вегетационный индекс;

$TSAVI = a * (NIR - a * R - b) / (a * NIR + R + a * b + x * (1 + a^2))$  где  $y = ax + b$ ,  $y$  – почвенная линия (линия вида  $y = x$  в пространстве  $b3/b4$ )  $a$  – точка пресечения  $b$  – наклон почвенной линии. Почвенная линия введена для уменьшения почвенного шума;

$GreenNDVI = (b4 - b2) / (b4 + b3)$  (Зеленый NDVI) – очень чувствителен к концентрациям хлорофилла;

$TVI = [(b4 - b3) / (b4 + b3) + 0.5]^{1/2} * 100$  интенсивность фотосинтеза, чистая продукция, транспирация, типы растительности

$VI = (b7 - b5) / (b7 + b5)$  (индекс растительности) – различия биомассы и типы растительности;

$NDB4B2 = (b4 - b2) / (b4 + b2)$  – активность хлорофилла;

$NDWI = (B5 - B4) / (B5 + B4)$  (нормализованный разностный водный индекс) – содержание воды в зеленой биомассе;

$LMI = b5 / b4$  содержание влаги в зеленой фитомассе;

$NDB4B6 = (b4 - b6) / (b4 + b6)$  – влажность поверхности;

$NSDI = (b1 - b4) / (b4 + b1)$ ; (нормализованный разностный снежный индекс) – чувствителен к мощности снега, льда;

$G/B = b2 / b1$  отражают почвы и горные породы с высоким содержанием железа

$R/G = b3 / b2$  различные типы растительности, водные объекты, заболоченные земли

$SWIR1\_G = b5 / b2$  различные типы растительности, водные объекты, заболоченные земли;

$SWIR2/R = b7 / b3$  дороги, селитебные земли, поля и другие антропогенные объекты

$SWIR1 = b7 / b5$  глинистые отложения и горные породы, богатые глиной

$BR = 0.33183 * b1 + 0.33121 * b2 + 0.55177 * b3 + 0.42514 * b4 + 0.48087 * b5 + 0.25252 * b7$  Общая яркость, альbedo (яркость)

$GR = -0.24717 * b1 - 0.16263 * b2 - 0.40639 * b3 + 0.85468 * b4 + 0.05493 * b5 - 0.11749 * b7$  Интенсивность фотосинтеза, чистая продукция, (зеленость)

$WET = 0.13929 * b1 + 0.22490 * b2 + 0.40359 * b3 + 0.25178 * b4 - 0.70133 * b5 - 0.45732 * b7$  Содержание влаги в зеленой фитомассе (влажность).

IR\_OX = B3/B1. Индекс содержания оксидов железа

CLAY = B5/B7. Индекс глинистых минералов

TNBVI = ((B4-B3/B4+B3)+0.5)\*\*0.5. Интенсивность фотосинтеза

B1\_B2 = B1/B2. Почвы с высоким содержанием железа

B3\_B7 = B3/B7. Дороги, селитебные земли, поля и другие антропогенные объекты

NDGR = (B2-B3)/(B2+B3). Типы растительности, заболоченные земли

Все они количественно отражают соответствующие ландшафтные характеристики (Кренке, Пузаченко, 2008).

Таким образом, каждый пиксель анализируемых снимков характеризовался значениями отраженной радиации в первых семи каналах, их отношениями и разностями, а также значениями характеристик рельефа, которые использовались в качестве независимых переменных в ПДА, общее количество которых составило 73 (7+7 – каналы двух снимков Landsat, 26+26 – индексы, рассчитанные для каждого снимка по семи каналам, 7 – характеристики рельефа).

Полигональный слой обучающей выборки преобразовывался в растровый и объединялся с растровыми слоями в одну пространственную

базу данных. При объединении слоев выполнялась унификация их пространственного разрешения до 15 м в 1 пикселе. Каждый полигон ландшафтной карты (обучающей выборки) получил номинальное цифровое значение, в зависимости от принадлежности к определенному ландшафту. Таким образом, названия ландшафтов были преобразованы в номинальную шкалу от 1 до 6 (см. выше). Впоследствии по этой номинальной шкале составлялась легенда к ландшафтной карте.

На следующем этапе проводился ПДА для обучающей выборки, классифицированной на 6 классов. ПДА проводился по критерию лямбда Уилкса со значением статистик F-ввода и F-исключения 3.84 и 2.71 соответственно. После актуализации карта была генерализована путем элиминирования выделов площадью менее 10 га, а границы контуров сглажены.

Все операции с пространственными и статистическими данными выполнены в геоинформационных пакетах ArcGIS, ERDAS IMAGINE, IBM SPSS, ENVI, Statistica.

## Результаты

Полученная с применением описанного метода карта ландшафтов Пинежского заповедника представлена на рис. 4. Границы ландшафтов, на-

**Таблица 1.** Физические характеристики каналов Landsat (цит. по: Кренке, 2011)

**Table 1.** Physical characteristics of Landsat channels (Krenke, 2011)

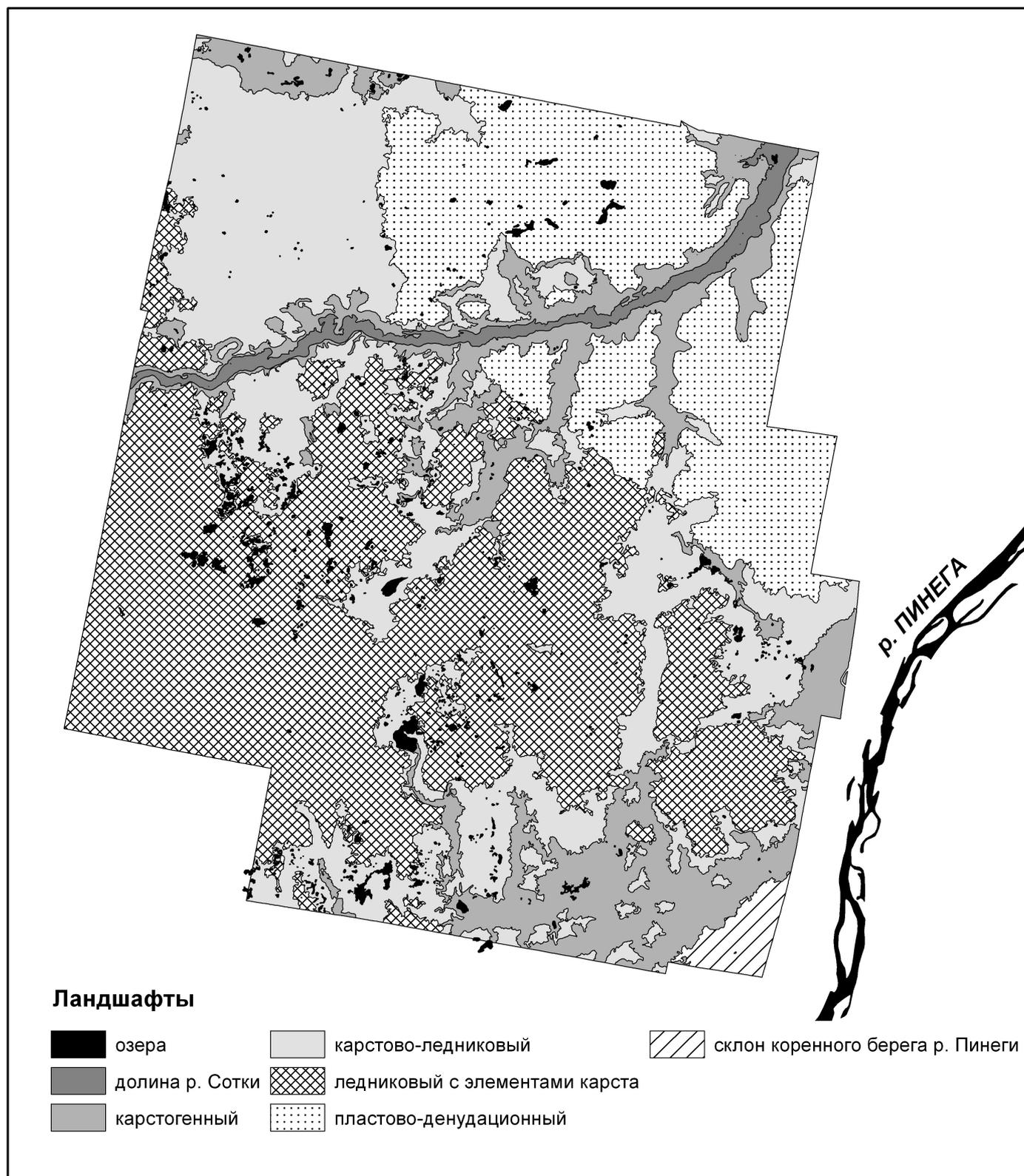
| Диапазон длин волн (нм) | Название             | Канал Landsat | Роль для растения   | Общая интерпретация назначения канала  |
|-------------------------|----------------------|---------------|---|--|
| 450–520                 | Синий                | b1            | Свет в этом диапазоне длин волн необходим для регуляции фотосинтеза   | чувствителен к атмосферным газам, мутности воды  |
| 525–600                 | Зеленый              | b2            | Свет в этом диапазоне длин волн полезен для фотосинтеза оптически плотных листьев, листьев нижних ярусов, густых посевов растений | различает состояния растительности   |
| 630–690                 | Красный              | b3            | Свет в этом диапазоне длин волн ярко выраженное действие на фотосинтез, развитие и регуляцию процессов                            | чувствителен в зоне сильного поглощения хлорофиллом при высокой отражательной способности для почв |
| 760–900                 | Ближний инфракрасный | b4            | Свет в этом диапазоне длин волн максимальное отражение клеточными структурами листа (около 50%)                                   | различает растительное многообразие и мощность растительности.                                     |
| 1555–1750               | Средний инфракрасный | b5            | Свет в этом диапазоне длин волн поглощается внутри и межклеточной водой, увеличивает скорость тепловых биохимических реакций      | в большей степени чувствителен к изменению содержания воды в тканях листьев                        |
| 2080–2350               | Дальний инфракрасный | b7            | Свет в этом диапазоне длин волн поглощается несвязанной водой в растительности и почвах   | чувствителен к варьированию влаги в растительности и почвах  |
| 10400–12500             | Тепловой             | b6            | Неселективное тепловое поглощение   | чувствителен к изменению теплового потока  |

ложенные на цифровую модель рельефа показаны на рис. 5. Проанализируем достоверность выделения ландшафтов на этой карте.

Метод пошагового дискриминантного анализа удобен тем, что позволяет отбросить неинформативные независимые переменные, наличие которых проверяется на каждом шаге работы по наибольшему F-критерию, а вся процедура останавливается только тогда, когда все невклю-

ченные переменные отбрасываются (Халафян, 2010). Таким образом, анализ идет по наиболее информативным переменным. Таблица 2 показывает, что из 73 дискриминирующих переменных, в анализе было отобрано 30. Значения F-критерия и уровень значимости показывают их высокую статистическую значимость (табл. 2).

По физическим характеристикам эти переменные можно разделить на 5 групп: продук-



**Рис. 4.** Актуализированная ландшафтная карта Пинежского заповедника.

**Fig. 4.** Updated map of landscapes of the Pinega State Reserve.

тивность растительности (RVI, GR, B1, NDVI, Wi, DVI, NDB4B2), насыщенность влагой (WET, NDB4B6, LMI, NDWI, B14, B12, R\_G), характеристики рельефа, параметры почв (SWIR1, TSAVI, SWIR2\_R, IR\_OX, B1\_B2) и температуру поверхности (B6, B13). Все эти переменные в тоже время можно рассматривать и как важные характеристики ландшафтов. Примечательно, что именно они были отобраны в ПДА.

Важным свойством дискриминантного анализа является заложенная в нем возможность уменьшения размерности пространства дискриминирующих факторов до дискриминантных осей. Количество дискриминантных осей устанавливается на единицу меньше числа групп в предикторе (обучающей выборке). Из табл. 3 видно, что максимальный разброс дисперсии факторов описывают только первые две оси, но все оси являются высоко значимыми (по хи-квадрат и уровню значимости). Первые две оси имеют высокую корреляцию с параметрами рельефа, продуктивности и влажности, поэтому можно говорить, что эти факторы являются ведущими при ландшафтном членении территории.

Проведенный анализ показал, что все выделенные группы (ландшафты) имеют низкую дисперсию, за исключением группы Д (долина р. Сотки) (рис. 6). Значения групп локализованы в более или менее компактные кластеры, а центрыиды их различаются. Что же касается долинного

ландшафта, то сильный разброс значений этой группы может и не говорить об ошибочности ее выделения, поскольку такая группа в нашей выборке только одна. Он может говорить скорее об отсутствии резких границ с близкими группами. И в этом нам поможет разобраться оценка качества классификации ПДА.

Качество классификации обучающей выборки показано в табл. 4. Она отражает количество совпадений между исходной и предсказанной принадлежностью классифицируемых объектов к группам выборки. Помимо этого, в таблице содержится информация о том, какие объекты были переопределены из одной группы в другую. В таблице показан процент пикселей исходной группы, отнесенных к предсказанной группе. Общее качество ПДА составило 90,2%, что достаточно высоко для пространственных данных Landsat (Гаврилюк, Ершов, 2012).

Из диагонали табл. 4 видно, что все группы (ландшафты) хорошо распознаются (качество распознавания 80.5–95.9%). Наилучшим образом классифицировались ландшафты ЛЭК и ПД (95.9 и 92.1% соответственно). Высокое качество классификации вновь выделенного ландшафта СКБ (93.9%) свидетельствует о правильности его выделения, так как столь высокий процент говорит о низкой дисперсии в этой группе и, следовательно, об уникальности набора пикселей, ей при-

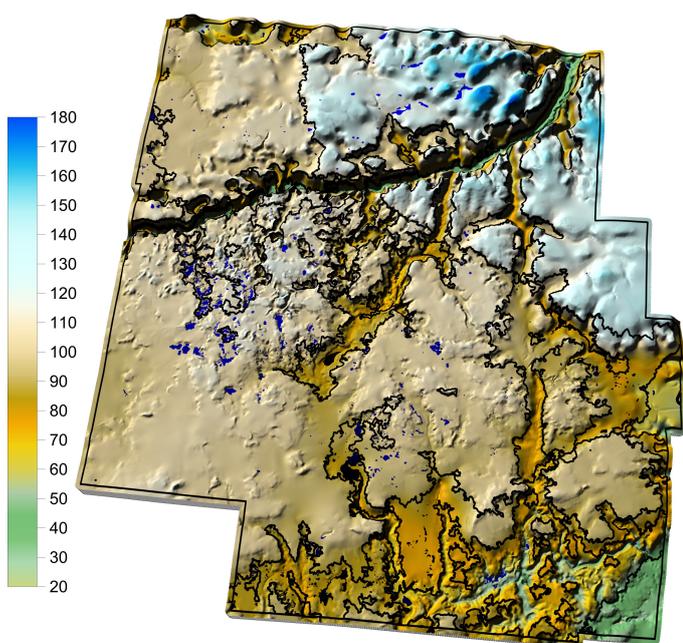


Рис. 5. Цифровая модель рельефа заповедника с ландшафтными границами.

Fig. 5. Digital elevation model of the Pinega State Reserve with boundaries between landscape divisions.

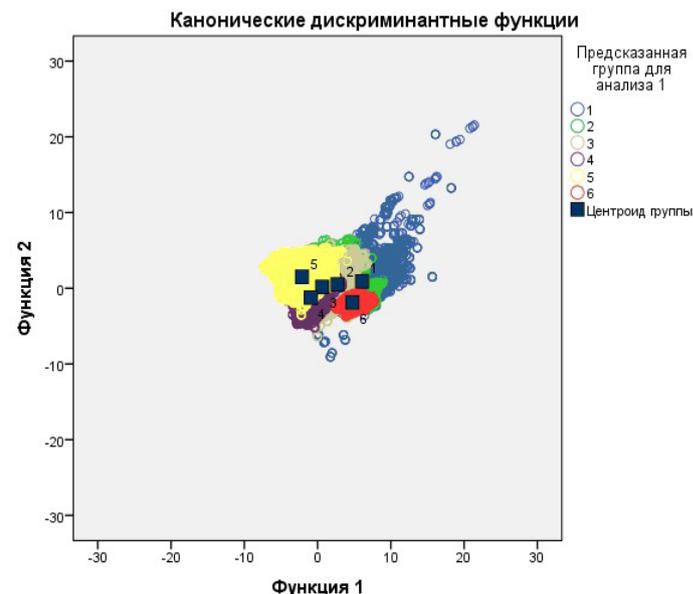


Рис. 6. Диаграмма рассеяния значений обучающей выборки в первых двух дискриминантных осях. Группы: 1 – Д; 2 – КГ; 3 – КЛ; 4 – ЛЭК; 5 – ПД; 6 – СКБ.

Fig 6. Scatterplot of predictor's values in the first two discriminant axes.

**Таблица 2.** Вклад в дискриминацию включенных в анализ переменных

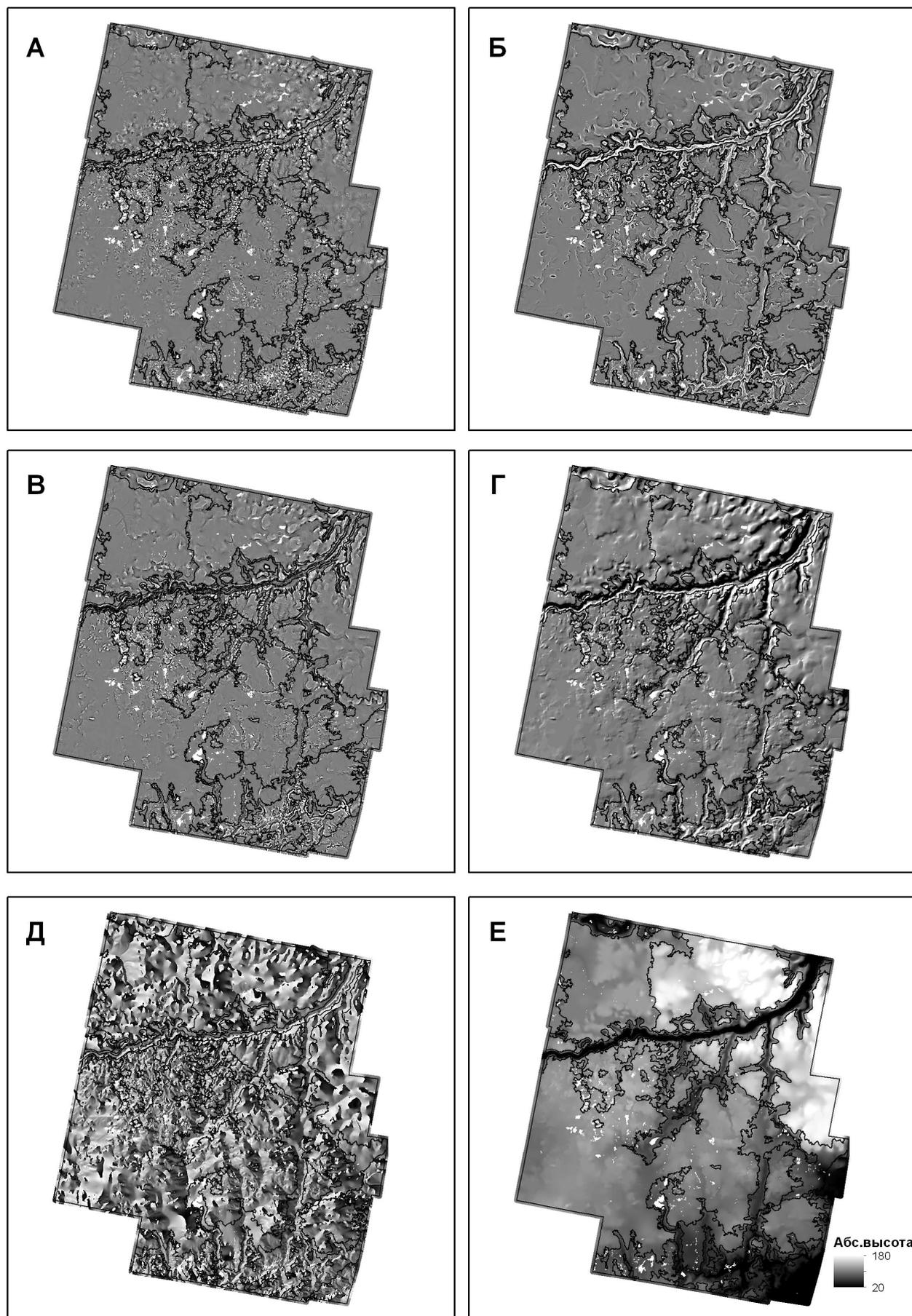
**Table 2.** Contribution of the included variables to discrimination

| Шаг | Переменные  | Лямбда Уилкса | F-критерий   | Степень свободы | Уровень значимости |
|-----|---|---------------|--------------|-----------------|--------------------|
| 1   | Абс.высота  | 0.308         | 10721560.630 | 5               | 0.000              |
| 2   | Уклон   | 0.189         | 6212830.206  | 10              | 0.000              |
| 3   | B6 (тепловой канал)   | 0.126         | 4904170.114  | 15              | 0.000              |
| 4   | WET (влажность фитомассы)   | 0.115         | 3647830.699  | 20              | 0.000              |
| 5   | B3_B7 (дороги, селитебные земли, поля и другие антропогенные объекты) | 0.107         | 2918260.029  | 25              | 0.000              |
| 6   | RVI (типы растительности)   | 0.101         | 2461530.039  | 30              | 0.000              |
| 7   | B1_B2 (почвы с высоким содержанием железа)                            | 0.096         | 2134650.165  | 35              | 0.000              |
| 8   | GR (интенсивность фотосинтеза)  | 0.092         | 1892050.696  | 40              | 0.000              |
| 9   | IR_OX (содержание железа в почве)                                     | 0.089         | 1700320.263  | 45              | 0.000              |
| 10  | NDB4B6 (влажность поверхности)  | 0.085         | 1559220.774  | 50              | 0.000              |
| 11  | профильная кривизна   | 0.083         | 1433420.818  | 55              | 0.000              |
| 12  | SWIR2_R (нарушенный растительный покров)                              | 0.081         | 1320350.866  | 60              | 0.000              |
| 13  | B13 (тепловой канал)  | 0.080         | 1224480.039  | 65              | 0.000              |
| 14  | TNBVI (интенсивность фотосинтеза)                                     | 0.079         | 1145820.994  | 70              | 0.000              |
| 15  | LMI (влажность фитомассы)   | 0.078         | 1075090.962  | 75              | 0.000              |
| 16  | NDWI (влажность фитомассы)  | 0.077         | 1012880.061  | 80              | 0.000              |
| 17  | NDGR  | 0.076         | 957460.348   | 85              | 0.000              |
| 18  | Освещенность рельефа  | 0.075         | 906820.223   | 90              | 0.000              |
| 19  | B14 (дальний инфракрасный)  | 0.075         | 860690.394   | 95              | 0.000              |
| 20  | B1 (синий)  | 0.074         | 819240.372   | 100             | 0.000              |
| 21  | NDVI (продуктивность растительности)                                  | 0.073         | 748360.996   | 110             | 0.000              |
| 22  | R_G (заболоченные земли)  | 0.073         | 718190.812   | 115             | 0.000              |
| 23  | TSAVI (почвенная линия)   | 0.072         | 689710.356   | 120             | 0.000              |
| 24  | Плановая кривизна   | 0.072         | 663180.339   | 125             | 0.000              |
| 25  | WI (различия биомассы)  | 0.072         | 638680.497   | 130             | 0.000              |
| 26  | NDB4B2 (активность хлорофилла)  | 0.072         | 615620.779   | 135             | 0.000              |
| 27  | DVI (продуктивность растительности)                                   | 0.072         | 594260.262   | 140             | 0.000              |
| 28  | Экспозиция склонов  | 0.071         | 574330.697   | 145             | 0.000              |
| 29  | SWIR1 (глинистые отложения)   | 0.071         | 555270.267   | 150             | 0.000              |
| 30  | B12 (средний инфракрасный)  | 0.071         | 537510.433   | 155             | 0.000              |

**Таблица 3.** Статистики дискриминантных осей

**Table 3.** Statistics of the discriminant axes

| Дискриминантная ось | Собственное значение | % объясненной дисперсии | Каноническая корреляция | Лямбда Уилкса | Хи-квадрат  | Степени свободы | Уровень значимости |
|---------------------|----------------------|-------------------------|-------------------------|---------------|-------------|-----------------|--------------------|
| 1                   | 3.692                | 71.2                    | 0.887                   | 0.071         | 6304205.951 | 155             | 0.000              |
| 2                   | 1.108                | 21.4                    | 0.725                   | 0.334         | 2615713.619 | 120             | 0.000              |
| 3                   | 0.272                | 5.2                     | 0.462                   | 0.704         | 836136.315  | 87              | 0.000              |
| 4                   | 0.086                | 1.7                     | 0.281                   | 0.896         | 262732.119  | 56              | 0.000              |
| 5                   | 0.028                | 0.5                     | 0.165                   | 0.973         | 65918.835   | 27              | 0.000              |



**Рис. 7.** Непрерывные поверхности характеристик рельефа с наложенными ландшафтными границами. А – плановая кривизна; Б – профильная кривизна; В – общая кривизна поверхности; Г – освещенность рельефа; Д – экспозиция склонов; Е – абсолютная высота.

**Fig. 7.** Grid-surfaces of the relief characteristics with boundaries between landscape divisions: А – plane curvature; В – profile curvature; С – total curvature; Д – hillshade; Е – aspect; F – altitude.

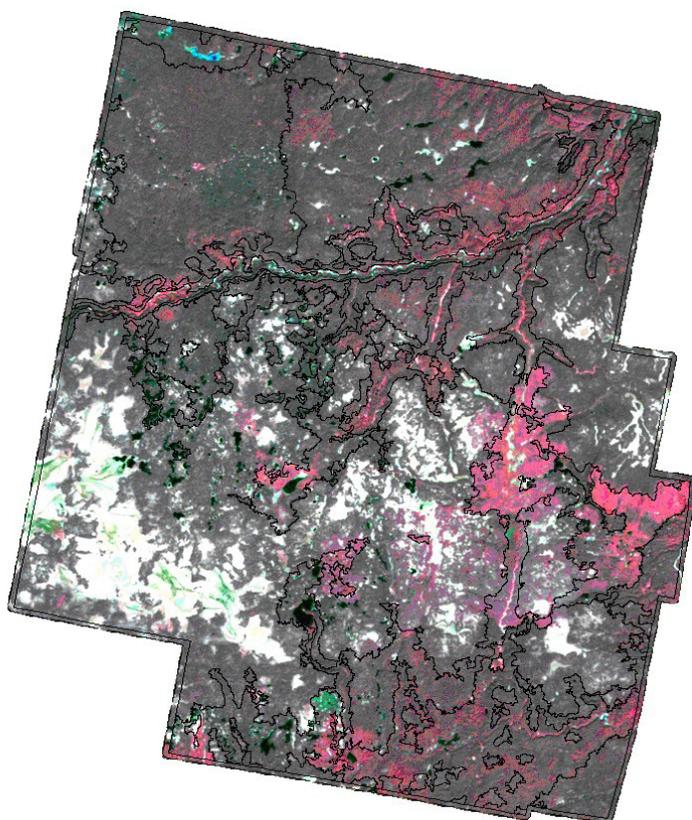
**Таблица 4.** Качество классификации ПДА

**Table 4.** Quality of the SDA classification

| Ландшафты |                | Предсказанная принадлежность к группе |       |        |        |        |        | Итого |        |
|-----------|----------------|---------------------------------------|-------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|
|           |                | Д                                     | КГ    | КЛ     | ЛЭК    | ПД     | СКБ    |       |        |
| Исходные  | Число пикселей | Д                                     | 51015 | 11107  | 278    | 0      | 0      | 993   | 63393  |
|           |                | КГ                                    | 4665  | 293482 | 47867  | 309    | 3477   | 1050  | 350850 |
|           |                | КЛ                                    | 3352  | 22167  | 515670 | 46571  | 15002  | 49    | 602811 |
|           |                | ЛЭК                                   | 4     | 73     | 30403  | 803919 | 4147   | 0     | 838546 |
|           |                | ПД                                    | 5     | 10177  | 11348  | 18422  | 464315 | 0     | 504267 |
|           |                | СКБ                                   | 93    | 1510   | 0      | 0      | 0      | 24512 | 26115  |
|           | % пикселей     | Д                                     | 80.5  | 17.5   | 0.4    | 0      | 0      | 1.6   | 100.0  |
|           |                | КГ                                    | 1.3   | 83.6   | 13.6   | 0.1    | 1.0    | 0.3   | 100.0  |
|           |                | КЛ                                    | 0.6   | 3.7    | 85.5   | 7.7    | 2.5    | 0     | 100.0  |
|           |                | ЛЭК                                   | 0     | 0      | 3.6    | 95.9   | 0.5    | 0     | 100.0  |
|           |                | ПД                                    | 0     | 2.0    | 2.3    | 3.7    | 92.1   | 0     | 100.0  |
|           |                | СКБ                                   | 0.4   | 5.8    | 0.0    | 0.0    | 0.0    | 93.9  | 100.0  |

90.2% исходных сгруппированных наблюдений классифицировано правильно

надлежащей, т.е. отличающегося от других групп. Заметим, что предварительный дискриминантный анализ территории заповедника только по четырем ландшафтам (ЛЭК, КЛ, КГ, ПД), показал значительно более низкое качество классификации ландшафта КГ – 48.8%, КЛ – 57.3% и высокую дисперсию в этих группах (часть территории, ранее отведенной на карте для КГ и КЛ занимает СКБ).



**Рис. 8.** Границы ландшафтов, наложенные на снимок Landsat 5.

**Fig. 8.** Boundaries between landscape divisions on the Landsat 5.

Несколько хуже классифицировались ландшафты КГ, КЛ и вновь выделенный Д. Для них качество классификации составило 83.6, 85.5 и 80.5% соответственно. Тем, не менее, эти группы обладают невысокой дисперсией (иначе бы принадлежавшие им пиксели «размазало» бы равномерно по другим группам), за исключением Д. На деле мы можем наблюдать, что из этих групп часть пикселей перераспределилась по «родственным» группам (ландшафтам) (табл. 4). Так, 17.5% пикселей перешло из Д в КГ и 13.6% – из КГ в КЛ. В этом нет ничего удивительного, так как данные ландшафты могут быть сходны как по рельефу, так и по растительности (что отражается и в сходном наборе пикселей каждой группы). Так, склоны долины р. Сотки непосредственно переходят в шелошняки их прибортовой части (КГ), поэтому можно считать, что с ландшафтной точки зрения здесь нет большой ошибки. За фактическую ошибку можно было бы считать ситуацию, если бы значительная часть пикселей, например, из КГ переопределилась, например, в ЛЭК (эти ландшафты довольно сильно различаются). Из табл. 4 видно, что такая ошибка очень

**Таблица 5.** Площади ландшафтов Пинежского заповедника

**Table 5.** Squares occupied by revealed landscape divisions of the Pinega State Reserve

| Ландшафт | Площадь |      |
|----------|---------|------|
|          | га      | %    |
| Д        | 949.9   | 1.8  |
| КГ       | 7587.7  | 14.6 |
| КЛ       | 14350.1 | 27.7 |
| ЛЭК      | 18913.1 | 36.5 |
| ПД       | 9505.8  | 18.3 |
| СКБ      | 500.4   | 1.0  |
| Всего    | 51807.0 | 100  |

низка – всего лишь 0.1%, поэтому ею можно пренебречь. Другими словами, высокая дисперсия при высоком качестве классификации группы Д (80.5%) указывает не на ошибку классификации, а является показателем исправления неточностей исходно выделенной группы.

Наложение границ полученной карты на характеристики рельефа показывает их хорошее совпадение (рис. 7). Визуальное сравнение с космическим снимком (рис. 8) также дает основание считать проведенные границы корректными.

На полученной нами карте площади ландшафтов распределяются следующим образом (см. табл. 5).

### Заключение

Полученная на основе многомерного анализа карта ландшафтов Пинежского заповедника является статистически достоверной, а границы ландшафтов в ней значительно уточнены по данным дистанционного зондирования.

### Литература

Андрейчук В.Н. Структурно-морфологический критерий классификации карстовых ландшафтов // Изучение Уральских пещер: докл. 2-й и 3-й конф. спелеологов Урала. Пермь: Пермский гос. ун-т, 1992. С. 101–103.

Гаврилюк Е.А., Ершов Д.В. Методика совместной обработки разносезонных изображений Landsat-TM и создания на их основе карты наземных экосистем Московской области // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. 2012. Т. 9. № 4. С. 15–23.

Кренке А.Н. Отображение факторов формирования ландшафта на основе тематических карт, дистанционной информации и трехмерной модели рельефа. Дисс... канд.биол.наук. 25.00.23. М.: ИГ РАН, 2011. 128 с.

Кренке А.Н., Пузаченко Ю.Г. Построение карты ландшафтного покрова на основе дистанционной информации // Экологическое планирование и управление. 2008. Т. 2. № 7. С. 10–25.

Малков В.Н., Шаврина Е.В. Морфология и развитие поверхностного карста // Компоненты экосистем и биоразнообразие карстовых территорий Европейского Севера России. Архангельск, 2008. С. 31–53.

Попов С.Ю., Пучнина Л.В. Инвентаризация земель Пинежского заповедника и прилегающих территорий и анализ их изменений по материалам космической съемки за период 1975–2011 гг. // Многолетняя динамика компонентов экосистем природного комплекса Пинежского заповедника и сопредельных территорий. Архангельск: ОАО «Соломбальская типография», 2012. С. 22–34.

Пузаченко Ю.Г. Математические методы в экологических и географических исследованиях. М.: АCADEMA, 2004. 416 с.

Рыков А.М. Ландшафтное районирование территории Пинежского заповедника // Геодинамика и экология. Материалы международной конференции (16–18 июня 1999). Архангельск, 1999. С. 318–319.

Рыков А.М., Рыкова С.Ю. Связь между био- и гео- разнообразием в областях проявления карста // Структура и

динамика природных компонентов Пинежского заповедника. Архангельск, 2000. С.201–211.

Сабуров Д.Н. Геоботаническая карта Пинежского заповедника. М 1 : 25 000. 1988. Фонды ГПБЗ «Пинежский».

Сабуров Д.Н. Леса Пинеги. Л.: Наука, 1972. 173 с.

Структура и динамика природных компонентов Пинежского заповедника. Архангельск, 2000. 265 с.

Халафян А.А. Математическая статистика с элементами теории вероятностей. М.: Бином, 2010. 491 с.

Шаврина Е.В., Малков В.Н. Геологическое строение и рельеф // Структура и динамика природных компонентов Пинежского заповедника. Архангельск, 2000. С. 15–37.

Шаврина Е.В., Малков В.Н. Особенности геологического строения, рельефа и водоносности территории // Компоненты экосистем и биоразнообразие карстовых территорий Европейского Севера России. Архангельск, 2008. С. 16–31.

USGS science for a changing world. URL: <http://earth-explorer.usgs.gov>

### References

Andreychuk V.N. The structural and morphological criteria for the classification of karst landscape. Study of the Ural caves: rep. 2nd and 3rd Conf. speleologists Urals. Perm: Perm State University Press, 1992. P. 101–103. [In Russian].

Gavrilyuk E.A., Ershov D.V. 2012. Methods of joint processing of seasonal images Landsat-TM and the creation on their base maps of terrestrial ecosystems of the Moscow Region. *Actual Problems of Remote Sensing of the Earth from space* 9(4): 15–23. [In Russian].

Krenke A.N. 2011. Display form factor components of the landscape on the basis of thematic maps, remote sensing information and three-dimensional terrain models. Diss ... kand. biol.nauk. 25.00.23. Moscow.: IG RAS. 128 p. [In Russian].

Krenke A.N. Puzachenko Y.G. 2008. Mapping land cover based on remote sensing information. *Environmental Planning and Management* 2(7): 10–25. [In Russian].

Malkov V.N., Shavrina E.V. 2008. Morphology and development of surface karst. Components of ecosystems and biodiversity of the karst areas of the European North of Russia. Arkhangelsk. pp. 31–53. [In Russian].

Popov S.Yu., Puchnina L.V. Land inventory of Pinezhsky State Reserve and adjacent areas and analysis of changes in materials of satellite imagery for the period 1975–2011. The long-term dynamics of the ecosystem components of the natural complex Pinezhsky Reserve and adjacent territories. Arkhangelsk: JSC “Solombalskaya typography”, 2012. P. 22–34. [In Russian].

Puzachenko Yu.G. 2004. Mathematical methods in ecological and geographical studies. Moscow: АCADEMA. 416 p. [In Russian].

Rykov A.M. Landscape zoning Pinezhsky State Reserve. Geodynamics and ecology. Proceedings of the International Conference (16–18 June 1999). Arkhangelsk, 1999. P. 318–319. [In Russian]

Rykov A.M., Rykova S.Yu. The relationship between bio- and geodiversity in the areas of karst // Structure and dynamics of natural ingredients Pinezhsky reserve. Arkhangelsk, 2000. P. 201–211. [In Russian].

Saburov D.N. Geobotanical map of the Pinega State Reserve. 1: 25 000 1988. Funds State Nature Biosphere Reserve “Pinezhsky.” [In Russian].

Saburov D.N. Forests of the Pinega. Leningrad: Science, 1972. 173 p. [In Russian].

Structure and dynamics of natural ingredients Pinezhsky reserve. Arkhangelsk, 2000. 265 p. [In Russian].

Khalafyan A.A. Mathematical Statistics with elements of the theory of probability. Moscow: Bean, 2010. 491 p. [In Russian].

Shavrina E.V., Malkov V.N. Geological structure and relief // Structure and dynamics of natural ingredients Pinezhsky reserve. Arkhangelsk, 2000. P. 15–37. [In Russian].

Shavrina E.V., Malkov V.N. Features of the geological structure, topography and water content of the territory. Components of ecosystems and biodiversity of the karst areas of the European North of Russia. Arkhangelsk, 2008. P. 16–31. [In Russian]

USGS science for a changing world. URL: <http://earth-explorer.usgs.gov>

## UPDATED LANDSCAPE MAP OF THE PINEGA STATE RESERVE

**S. Yu. Popov**

*Lomonosov Moscow State University*

*E-mail: s\_yu\_popov@rambler.ru*

The article discusses the cycle of updating the landscape map of the Pinega State Reserve. This reserve is located in the Arkhangelsk District, in the northern taiga subzone (64°35N, 42°58E) in Russia. A landscape map of the reserve made in 1999 was established on the basis of only the topographical maps and is very schematic. The modern technique of the combined spatial data stepwise discriminant analysis (SDA) of Landsat and DEM data was used aiming to update the map of landscapes of the Pinega State Reserve. The stepwise criterion of lambda values have shown a high level of SDA reliability (the quality of classification is 90.2%). The independent variables for PDA were the brightness characteristics of Landsat channels, the spectral indices and the characteristics of the terrain. A numbers of 73 independent variables have been used in the analysis. Areas of the old landscape map were used as a predictor. All operations with spatial and statistical data are made in the geo-information packages ArcGIS, ERDAS IMAGINE, IBM SPSS, ENVI, Statistica. A detailed analysis of the quality of SDA is provided. Two new landscape types have been revealed as a result of using SDA; moreover, the updated map of landscapes of the Pinega State Reserve has more accurate boundaries now. Obtained on the basis of multivariate analysis the landscape map of the Pinega State Reserve is statistically significant. Landscape squares are calculated.

**Key words:** digital elevation model, discriminant analysis, GIS technology, Landsat, Landscape map, SDA.