

УДК 911.2

**ВЕГЕТАЦИОННЫЕ ИНДЕКСЫ И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ  
ДЛЯ КАРТОГРАФИРОВАНИЯ ГОРНЫХ ЛАНДШАФТОВ  
РОССИЙСКОГО КАВКАЗА**

**Братков Виталий Викторович**

доктор географических наук

Московский государственный университет геодезии и картографии  
Москва

**Атаев Загир Вагитович**

кандидат географических наук

Дагестанский государственный педагогический университет, Махачкала

Прикаспийский институт биологических ресурсов  
Дагестанского научного центра РАН, Махачкала

**Аннотация.** Рассматривается возможность применения спектральных (вегетационных) индексов для картирования горных ландшафтов Российского Кавказа, повышающих точность выделения контуров природно-территориальных комплексов (ПТК).

**Ключевые слова:** природно-территориальный комплекс, ландшафт, фитомасса, дистанционное зондирование, вегетационные индексы, NDVI, TDVI, SAVI, Российский Кавказ.

# VEGETATION INDEXES AND THEIR USE FOR MAPPING MOUNTAINOUS LANDSCAPES OF THE RUSSIAN CAUCASUS

**Bratkov Vitaly Viktorovich**

D.Sc. (Geography)

Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow

**Ataev Zagir Vagitovich**

Ph.D. (Geography)

Dagestan State Pedagogical University, Makhachkala

Caspian Institute of Biological Resources of  
Dagestan Scientific Center of RAS, Makhachkala

**Abstract.** The article deals with the possibility of using spectral (vegetation) indexes for mapping mountainous landscapes of the Russian Caucasus, improving the accuracy of the peaking of natural territorial complexes (PTC).

**Keywords:** natural territorial complex, landscape, phytomass, remote sensing, vegetation indexes, NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), TDVI (Transformed Difference Vegetation Index), SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index), the Russian Caucasus.

## **Постановка проблемы**

Ландшафтные исследования традиционно связаны с разработкой ландшафтной карты, на которой отображают размещение природно-территориальных комплексов (ПТК) различных рангов и их пространственное соотношение [1]. Создание и обновление ландшафтных карт в настоящее время опирается не только на традиционные полевые исследования, но также и на данные дистанционного зондирования (ДДЗ) и геоинформационные (ГИС) технологии. Эти подходы, основанные на анализе разнообразной не только качественной, но и количественной информации, способствуют повышению объективности и точности при выделении ПТК различных рангов, а также дают возможность проводить мониторинг ландшафтов и оценивать различные воздействия на них. Для Российского Кавказа с применением части этих методов и по единой системе классификации ландшафтов [2] были созданы ландшафтные карты на территории горного Дагестана [3], Карачаево-Черкессию [4] и Чеченскую Республику [5] в масштабе 1:200 000.

В настоящее время возможности применения данных дистанционного зондирования значительно расширились. Это связано с тем, что в открытом доступе увеличилось как количество разнообразных данных дистанционного зондирования, получаемых при помощи разных сенсоров, так и с тем, что постоянно совершенствуется программное обеспечение для их обработки.

Для целей среднемасштабного картографирования ландшафтов наиболее широко используются данные мультиспектральных снимков сенсора Landsat. Последнее поколение этих спутников, находящихся на орбите в настоящее время, с периодичностью один раз в 2 недели позволяют получать снимки на интересующую территорию. В отличие от предыдущего поколения у них увеличилось количество спектральных каналов до 11, что позволяет с достаточной степенью точности дешифровать разнообразные природные объекты.

Сложность дешифрирования и классификации природных объектов, их объединения в природные комплексы связана с тем, что ландшафт по своему характеру является комплексным образованием, в состав которого входят разнообразные и разнородные элементы и компоненты.

### **Результаты исследований**

Для создания ландшафтной карты требуется, прежде всего, анализ рельефа. По мнению Н.А. Солнцева [6] рельеф является наиболее сильным ландшафтообразующим фактором, а его действие проявляется через гипсометрию, крутизну и экспозицию склонов, сочетание которых приводит к формированию местоположений. Для территории Центрального Кавказа с использованием данных дистанционного зондирования (SRTM), в среде ArcGIS была создана цифровая модель рельефа изучаемой территории. Она позволила выделить высотные ступени на изучаемой территории, а также составить карту крутизны склонов. Сопряженный анализ высотных отметок и крутизны склонов показал, что на территории Центрального Кавказа довольно хорошо просматривается тенденция увеличения крутизны склонов по мере роста абсолютной высоты [7]. Очевидно, что возможны и более тонкие количественные оценки рельефа при создании ландшафтной карты, однако для разделения территории на высотные ступени, от которых зависят климатические параметры территории, этим можно ограничиться.

Довольно сложной задачей при составлении ландшафтной карты является классификация растительности. Если раньше для исследования растительности необходимо было проведение полевых исследований, то в настоящее время эта задача может быть решена довольно точно на основе данных дистанционного зондирования. Растительность для целей ландшафтного картографирования необходимо классифицировать как с качественной (видовой состав), так и с количественной точки зрения (например, запасы фитомассы). Если для классификации видового состава растительности используются ее спектральные отража-

тельные свойства в отдельных каналах, то для определения физиономических типов растительности (древесная, кустарниковая и травянистая) широко используются разнообразные вегетационные индексы.

А.С. Черепанов и Е.Г. Дружинина [8] отмечают, что в настоящее время существует около 160 вариантов, а расчет большей части вегетационных индексов базируется на двух наиболее стабильных (не зависящих от прочих факторов) участках кривой спектральной отражательной способности растений. На красную зону спектра (RED—0,62-0,75 мкм) приходится максимум поглощения солнечной радиации хлорофиллом, а на ближнюю инфракрасную зону (NIR—0,75-1,3 мкм) максимальное отражение энергии клеточной структурой листа. То есть высокая фотосинтетическая активность (связанная, как правило, с большой фитомассой растительности) ведет к более низким значениям коэффициентов отражения в красной зоне спектра и большим значениям в ближней инфракрасной. Именно отношение этих показателей друг к другу позволяет четко отделять растительность от прочих природных объектов.

Наиболее популярным вегетационным индексом является NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), нормализованный разностный индекс растительности. Он основан на отношении отражения в красной и ближней инфракрасной спектральных зонах. Его значения изменяются в диапазоне от -1 до +1. Благодаря особенностям отражения в NIR-RED областях спектра, природные объекты, не связанные с растительностью, имеют фиксированное значение NDVI, что позволяет использовать этот параметр для их идентификации (табл. 1).

Уточнение данных таблицы имеется в работе [10], где даются более точные градации индекса. Так, величины NDVI до -0,33 соответствуют водным объектам, интервал от -0,1 до 0,1 соответствует выходам горных пород, пескам, снегу; до 0,2 – открытой почве, 0,2-0,4 – кустарникам и пастбищам (травянистой растительности); 0,4-0,5 – скудной и разреженной древесной и кустарниковой растительности; густой лесной рас-

ительности соответствуют величины NDVI более 0,67-0,8, а значения индекса выше 0,8 соответствует очень мощной и густой растительности. В целом интервалы значений NDVI довольно хорошо увязываются с указанными выше физиономическими типами растительности (древесная, кустарниковая и травянистая).

Таблица 1

**Значение NDVI для различных природных объектов [9]**

Тип объекта	Значение NDVI
Густая растительность	0,7
Разряженная растительность	0,5
Открытая почва	0,025
Облака	0
Снег и лед	-0,05
Вода	-0,25
Искусственные материалы (бетон, асфальт)	-0,5

Е.Н. Сутырина [11] указывает на то, являясь искусственным безразмерным показателем, NDVI в первую очередь предназначен для измерения эколого-климатических характеристик растительности, но в то же время может иметь тесную связь с такими параметрами, как влажность и органическая насыщенность почвы, эвапотранспирация, объем выпадаемых осадков и т.д. Зависимость между этими параметрами и NDVI, как правило, не прямая и связана с особенностями исследуемой территории, ее климатическими и экологическими характеристиками, кроме этого, часто приходится учитывать временную разнесённость исследуемой характеристики и ответной реакции NDVI.

В связи с относительной простотой вычисления NDVI он активно применяется для целей тематического картографирования, в том числе и создания ландшафтных карт [12]. Фактически этот спектральный индекс связан с таким ландшафтно-геофизическим показателем ПТК, как запасы фитомассы. Последняя, особенно в горах, отражает комплекс локальных физико-географических условий: абсолютной высоты, экспози-

ции и крутизны склонов, от которых зависят поток солнечной радиации и термический режим, а также положение по отношению к господствующему переносу воздушных масс. В этой связи в горах принято выделять соляные и циркуляционные склоны, на которых формируются разные типы растительных сообществ с разными запасами фитомассы. То есть, фитомасса выступает индикатором внутриландшафтных условий и является хорошим критерием для выделения крупных контуров (ранга типа) ландшафтов.

Масса живого вещества является одним из критериев организованности геосистемы [13]. Биологическое сообщество, которое является блоком геосистемы, по мнению Б. Паттена [14] запрограммировано так, что оно выбирает стратегию максимальной биомассы. Эта стратегия осуществляется в рамках открытой природной системы в зависимости от ее потенциала, структурных возможностей и воздействия на геосистему окружающей ее среды. Именно биомасса характеризует многие особенности геосистемы, ее инерцию и динамические тенденции. В этом отношении биомасса представляет наибольший интерес для исследователей.

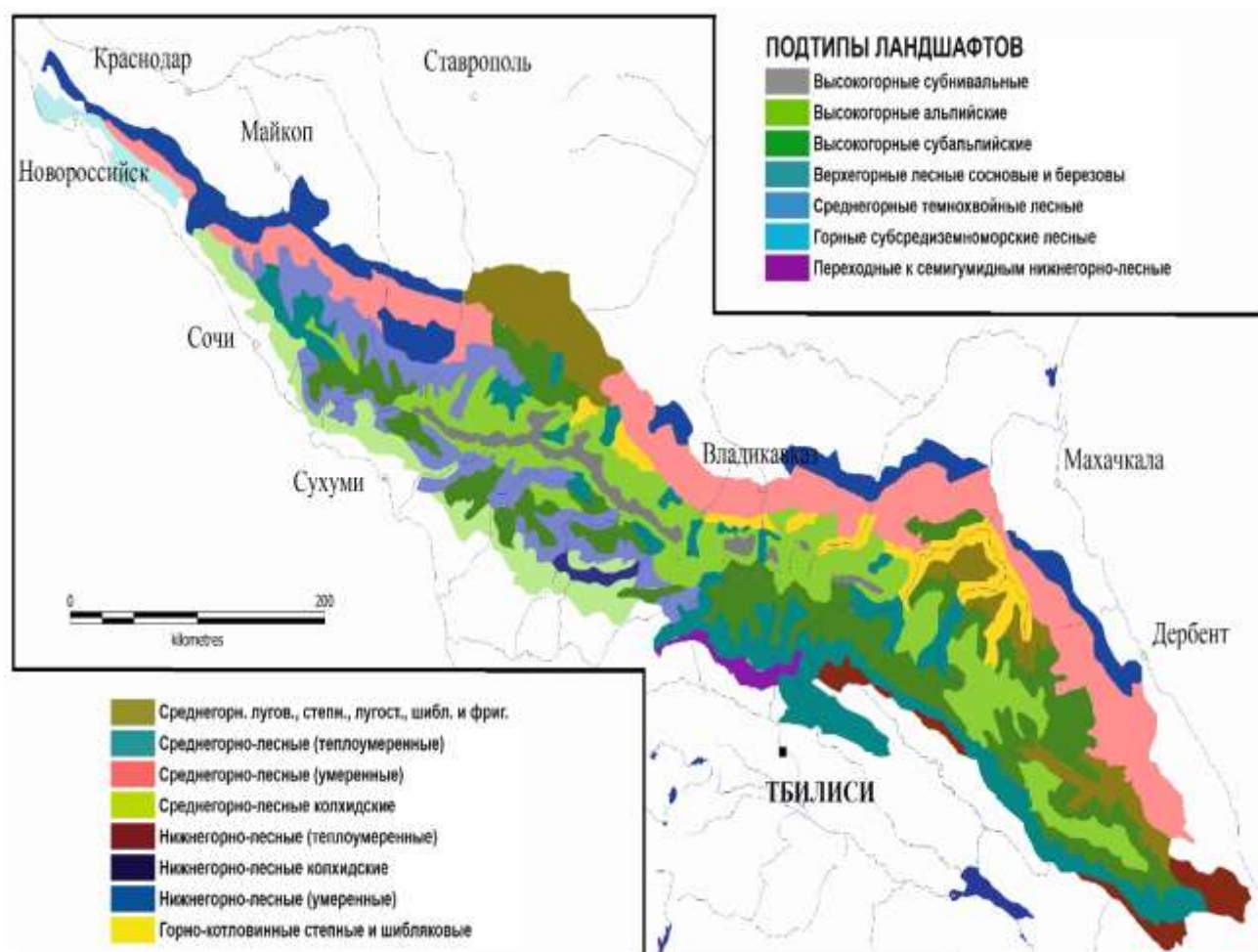
Биомассатрадиционно подразделяется на фито- и зоомассу. Исследованию фитомассы посвящено большое количество работ, результатом которых стали довольно подробные характеристики гео/экосистем с точки зрения запасов фитомассы в них [15; 16]. При этом запасы фитомассы определялись на основе полевых исследований.

На территории Кавказа изучением запасов фитомассы как структурно-функциональной части природно-территориальных комплексов (в рамках геофизики ландшафта) занимались Н.Л. Беручашвили [17; 18], А.Г. Тедиашвили [19] и В.В. Братков [20-22], в работах которых имеются сведения по запасам как суммарной фитомассы, так и ее фракционных частей (табл. 2, рис. 1).

**Сводная таблица запасов фитомассы горных ландшафтов  
Российского Кавказа [20]**

ЛАНДШАФТЫ		P	P <sub>надз.</sub>	P <sub>i</sub>
Типы	Подтипы			
Горные теплоумеренные гумидные	Переходные к семигумидным, нижнегорно-лесные	152	119	0,6
	Среднегорно-лесные теплоумеренные	280	226	0,4
Горные умеренные гумидные	Нижнегорно-лесные умеренные	192	155	0,1
	Среднегорно-лесные умеренные	184	148	0,3
Горные холодноумеренные	Среднегорно-лесные темнохвойные	420	352	0,7
	Верхнегорно-лесные сосновые и березовые	177	142	2,0
Горные умеренные семигумидные	Среднегорные луговые, степные, луго-степные, шибляковые и фригановые	12	3,8	1,4
Горные умеренные семиаридные	Горно-котловинные степные и шибляковые	13	2,2	0,5
Высокогорные луговые	Субальпийские	15	2,5	2,5
	Альпийские	8	0,5	0,5

**Примечание:** P – суммарная фитомасса, P<sub>надз.</sub> – надземная фитомасса, P<sub>i</sub> – фитомасса травянистая



**Рис. 1. Ландшафты Большого Кавказа**



В.В. Братков [20] отмечает, что запасы суммарной фитомассы в ландшафтах отличаются довольно существенно. Во-первых, ландшафты с травянистым и кустарниковым характером растительности содержат ее на порядок меньше, чем лесные ПТК. Колебания в пределах указанных групп достигают 2-3 раз. Максимальными ее запасами характеризуются среднегорно-лесные темнохвойные ландшафты – 420 т/га, при этом, как уже отмечалось, в отдельных ПТК буково-темнохвойных лесов ее содержится более 1000 т/га. Далее следуют среднегорно-лесные ландшафты южного макросклона Большого Кавказа (восточно-закавказские) с запасами фитомассы 250-280 т/га. Именно для этих ландшафтов характерно оптимальное соотношение тепла и влаги ( $GTK = 2,0$ ,  $Ky = 1,1-1,2$ ). Следующая группа – умеренные гумидные северо-кавказские ландшафты, верхнегорно-лесные сосновые и березовые, а также нижнегорно-лесные колхидские. В целом хорошо заметно, что среднегорные ландшафты опережают нижнегорные по запасам суммарной фитомассы. Что касается травянистых и кустарниковых ПТК, то колебания суммарной фитомассы в них также довольно значительные. Среднегорные луговые, степные, лугостепные, шибляковые и фригановые ландшафты, горно-котловинные степные и шибляковые, а также субальпийские ландшафты характеризуются довольно близкими запасами суммарной фитомассы – 10-15 т/га. Помимо основного отличия от лесных ПТК по запасам фитомассы, основная часть фитомассы сосредоточена в подземной части. Наконец, минимальные запасы суммарной фитомассы формируются в альпийских ландшафтах.

Как показывают приведенные данные, в пределах ландшафтов, относящихся к разным классификационным единицам, имеются природно-территориальные комплексы, запасы фитомассы в которых довольно близки. Например, ландшафты с преобладанием травянистой растительности (высокогорные луговые, горные умеренные семигумидные и горные умеренные семиаридные) характеризуются довольно близкими запасами фитомассы (табл. 3).

**Запасы фитомассы природно-территориальных комплексов  
горных умеренных семигумидных, горных умеренных  
семиаридных и высокогорных луговых ландшафтов [20]**

Природно-территориальные комплексы (группы фаций)	P	P <sub>надз.</sub>	P <sub>i</sub>	P <sub>k</sub>
Полынные и солянковые полупустыни на серых горно-пустынных почвах	6	0,9	0,0	0,8
Заросли можжевельника (часто в комплексе со степной растительностью) на рендзинах и коричневых почвах	11	5,3	0,7	0,8
Разнотравно-злаковые луга на горно-луговых почвах	15	2,4	2,4	0,0
Злаково-разнотравные луга на горно-луговых почвах	11	1,8	1,8	0,0
Заросли астрагала (фригана) на серо-коричневых почвах	22	2,8	0,8	2,1
Заросли колючих кустарников (шибляк) на серо-коричневых почвах	9	5,1	0,7	0,0
Смешанно-дубовые леса и дериваты на коричневых и серо-коричневых почвах	20	15,5	0,2	0,0
Разнотравно-злаковые степи и лугостепи на горных коричневых и серо-коричневых почвах	7	1,1	1,0	0,0
Злаково-разнотравные степи и лугостепи на горных коричневых и серо-коричневых почвах	8	1,4	1,4	0,0
Заросли можжевельника на горно-луговых, часто скелетных почвах	34	11,6	0,4	2,4
Заросли рододендрона кавказского («декиани») на горно-луговых, часто оторфованных почвах	25	8,6	0,8	3,2
Низкотравные альпийские луга и ковры на горно-луговых почвах	3	2,1	0,6	0
Разнотравно-злаковые луга на горно-луговых почвах	10	6,7	1,8	0
Злаково-разнотравные луга на горно-луговых почвах	16	10,3	3,1	0
Высокотравные злаково-разнотравные (иногда с большой долей зонтичных) луга на горно-луговых почвах	25	15,5	5	0
Лугостепи на горно-луговых и черноземовидных почвах	7	4,8	1,2	0

**Примечание:** P – суммарная фитомасса, P<sub>надз.</sub> – надземная фитомасса, P<sub>i</sub> – фитомасса травянистая, P<sub>k</sub> – фитомасса кустарниковая.

Внутриландшафтные различия в запасах фитомассы связаны с мозаичностью локальных условий. Последнее находит свое выражение в том, что в пределах ландшафтов, относящихся к одному роду или виду, могут встречаться разные группировки растительности, приуроченные к разным местоположениям. В итоге, например, в пределах субальпийских ландшафтов, где преобладает травянистый характер растительности, имеются также фрагменты зарослей рододендрона кавказского, называемые ботаниками «родореты» или «декиани», которые по запа-

сам фитомассы значительно превосходят типичные травянистые ПТК (табл. 3). И, наконец, здесь же, в субальпах имеются фрагменты лесов, которые ботаники относят к категории субальпийских [23; 24], а географы – к высокогорным ландшафтам. Аналогичная мозаичность внутриландшафтных условий характерна и для ландшафтов с лесным характером растительности. Здесь, в отличие от ландшафтов с травянистой растительностью, на запасы фитомассы оказывают влияние не только разнообразие внутриландшафтных условий, но и возраст древостоев.

Таким образом, при использовании вегетационных индексов для составления ландшафтной карты, необходим анализ пространственного распределения их величины, которая в случае, например, NDVI фактически отражает такой показатель растительности, как ее характер и плотность, связанные с запасами фитомассы. В результате, как отмечалось выше, необходимо учитывать тот фактор, что участки с близкими показателями вегетационных индексов могут относиться к разнотипным ландшафтам.

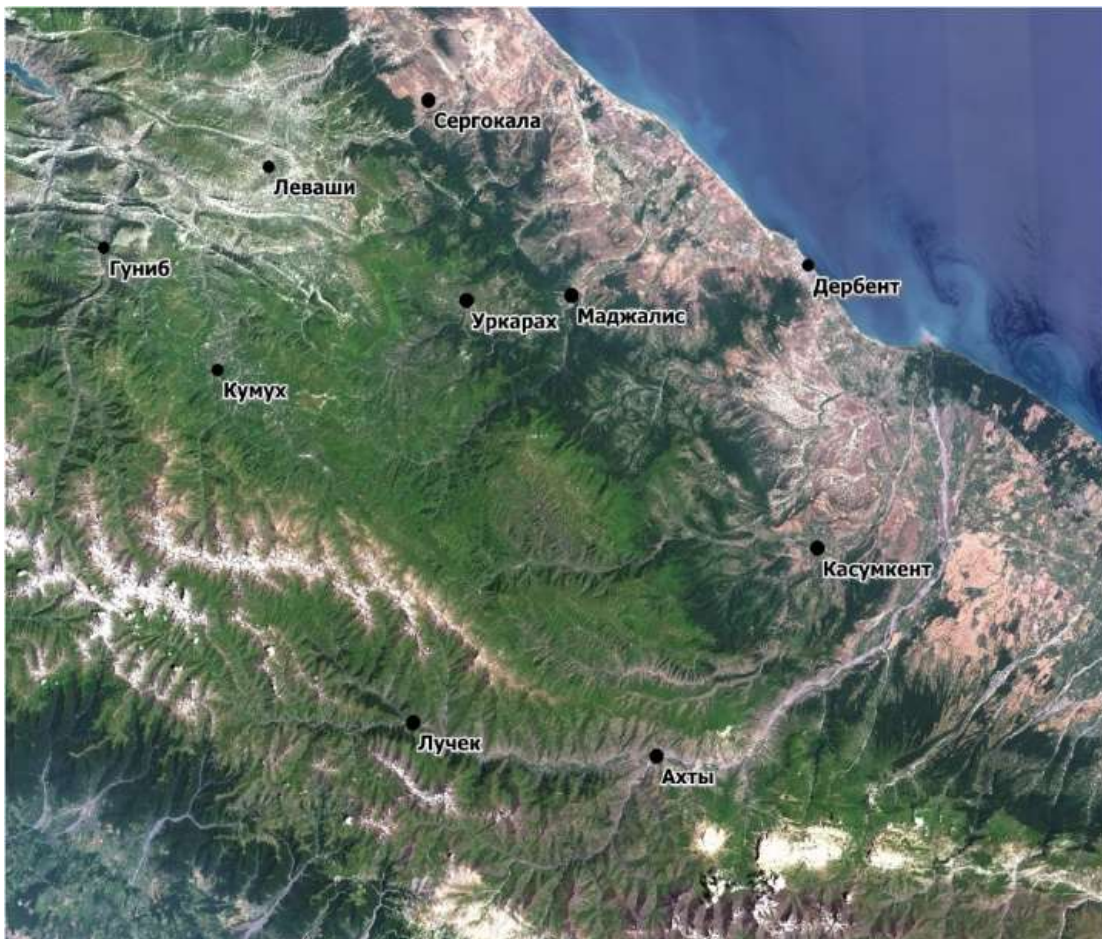
В настоящее время функция для вычисления большей части вегетационных индексов является стандартной в программе для обработки мультиспектральных снимков ENVI 5.3, где предусмотрена возможность расчёта до 40 спектральных индексов, значительная часть которых относится к вегетационным.

В качестве тестового полигона для выявления связи между величинами вегетационных индексов и природно-территориальными комплексами был выбран участок Северо-Восточного Кавказа. Здесь в нижней части гор представлены как древесные, так и кустарниковые ПТК, а в высокогорьях имеются луговые и гляциально-нивальные ландшафты. Еще одной особенностью этого района является то, что здесь максимально широко на всем северном склоне Большого Кавказа представлены кустарниковые ПТК, относящиеся преимущественно к горным умеренным семиаридным и семигумидным ландшафтам.

Для вычисления спектральных индексов был выбран летний снимок, так как в это время года ПТК находятся в фазе активной вегетации. Предварительная обработка мультиспектральных снимков серии Landsat 8 (геометрическая, термальная и атмосферная коррекции), а также вычисление собственно спектральных индексов осуществлялось при помощи программы ENVI 5.3. Наиболее информативными для целей ландшафтного картографирования, как показал предварительный анализ, кроме NDVI, являются такие спектральные индексы, как TDVI (Transformed Difference Vegetation Index, трансформированный разностный вегетационный индекс) и SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index, почвенный вегетационный индекс).

Для уточнения особенностей их распределения по изучаемой территории полезными будут также снимок в естественных цветах (RGB, true color), а также цифровая модель рельефа. Исходный снимок тестового региона от 18.07.2016 г. и цифровая модель рельефа в пределах Северо-Восточного Кавказа иллюстрирует рис. 2.

Пространственное распределение NDVI по тестовой территории в пределах Северо-Восточного Кавказа иллюстрирует рис. 3. Наименьшие величины NDVI (менее 0) отмечаются на суше в самых возвышенных участках и соответствуют гляциально-нивальным ландшафтам и прилегающим к ним выходам скальных пород. **Величины NDVI до 0,1-0,2** приурочены прежде всего к высокогорьям на высотах от 3000 м и более, то есть в верхнем высотном диапазоне высокогорных луговых ландшафтов. Здесь наибольшие площади занимают высокогорные субнивальные комплексы, где сплошной почвенно-растительный покров практически отсутствует, а отдельные фрагменты луговой растительности представлены пятнами. Природные комплексы, характеризующиеся низкими значениями NDVI, имеются также и в нижнем ярусе гор: как и в высокогорьях, это участки, практически лишенные растительности по причине крайне скудного увлажнения, а также антропогенного влияния (перевыпас). Кроме ука-



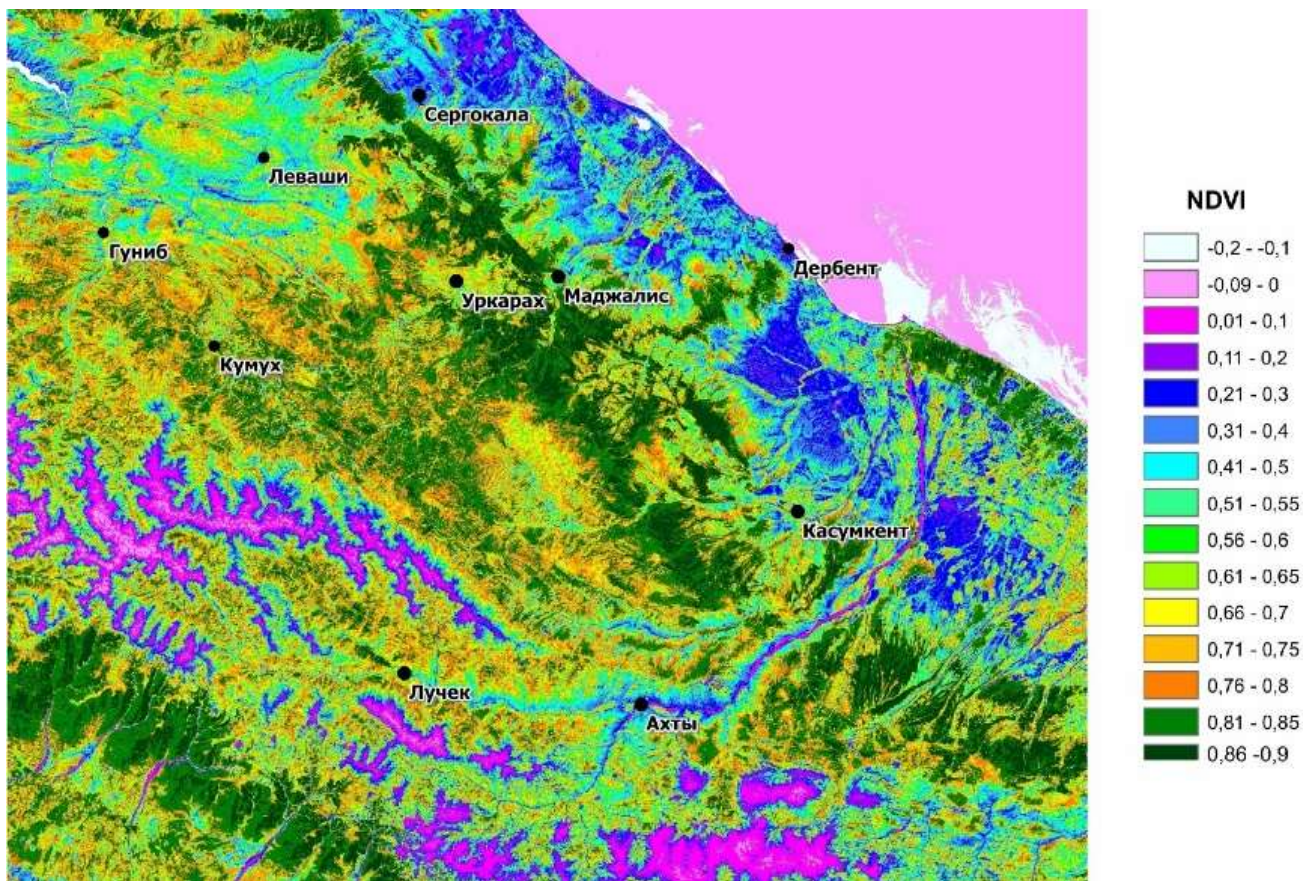
(а)



(б)

Рис. 2. Исходный снимок на территорию Северо-Восточного Кавказа в естественных цветах (а) и цифровая модель рельефа (б)

занных зональных природных комплексов, столь низкие значения NDVI отмечаются также в пределах речных пойм (хорошо выражен в среднем и нижнем течении Самура и реках южного склона Большого Кавказа), а также в районах котловин (Ахты).



**Рис. 3. Пространственное распределение NDVI по территории Северо-Восточного Кавказа**

*Градация NDVI в интервале 0,2-0,4* (открытая почва, травянистая и кустарниковая растительность) характерна для высот ниже 2500 м, что соответствует разным вариантам ПТК с травянистым и кустарниковым типом растительности. Например, в окрестностях Леваши преобладают ПТК со значением данного индекса 0,3-0,4, что соответствует среднегорным луговым, степным, лугостепным, шибляковым и фригановым ландшафтам, которые формируются во Внутригорном Дагестане в результате малого количества осадков. Однако такие же величины NDVI характерны и в предгорной части, где им соответствуют участки со степ-

ной и полупустынной растительностью, широко представленной в пределах Предгорного Дагестана. Наряду с травянистыми ценозами, здесь имеются довольно крупные фрагменты кустарников (заросли держидерева, или шибляки), а также сельскохозяйственные угодья (поля, виноградники и пастбища). Более низкие значения индекса характерны также для участков, прилегающих к Каспийскому морю.

**Значения NDVI в пределах 0,4-0,5** соответствуют участкам с кустарниковой и разреженной древесной растительностью. В эту категорию попадают как горные умеренные семиаридные и семигумидные, для которых характерны ценозы с данным типом растительности, так и горные умеренные гумидные ландшафты, для которых более характерны древесные ПТК со слабой сомкнутостью древесного яруса или низколесья. Такие в пределах лесных горных умеренных гумидных ландшафтов отмечаются как в нижнегорьях, где они представляют переходную полосу от степных и полупустынных ландшафтов, так и в среднегорьях, где происходит переход от горно-лесной к горно-луговой растительности.

**Значения NDVI от 0,5 до 0,7** имеют довольно широкое распространение на территории тестового полигона и характерны для ландшафтов с кустарниковым и разреженно-древесным характером растительности. К ним относятся горные умеренные семигумидные и семиаридные ландшафты, а также горные умеренные гумидные.

Горные умеренные семигумидные ландшафты на территории Северо-Восточного Кавказа распространены в интервале высот от 800-1000 до 1600-1700 м. Этот тип ландшафта расположен на территории провинции Внутригорного Дагестана и приурочен главным образом к соляным склонам Андийского хребта, хр. Салатау, занимает практически всю территорию Гимринского хребта, плато Аракмеэр, хребты Рухумеэр, Чакулабек и др. Кроме того, встречается также в расширенных участках речных долин. В пределах данного типа ландшафтов выделяется один подтип ландшафтов: среднегорные луговые, степные лугостепные, шибляковые и фрига-

новые, который подразделяется на два рода: 1) среднегорные карстовые, с лугами, лугостепями, шибляком и фриганой; 2) среднегорные эрозионно-денудационные, с лугами, лугостепями и шибляком.

Горные умеренные семиаридные ландшафты на территории Горного Дагестана распространены в интервале высот от 600-700 до 1100-1200 м и приурочены исключительно к котловинам, которые характерны для Внутригорного Дагестана. Котловины сложены терригенными и молассовыми формациями и для их днищ характерен эрозионно-аккумулятивный рельеф. В пределах распространения данного типа ландшафта представлен один подтип – горно-котловинные степные, шибляковые и фригановые. Он включает в себя один род ландшафта – горно-котловинные эрозионно-аккумулятивные с горно-степной, шибляковой и фригановой растительностью.

Горные умеренные гумидные ландшафты на территории Дагестана распространены в интервале высот от 300-500 до 1500-1600 м над уровнем моря. Они приурочены преимущественно к северным и северо-восточным склонам основных хребтов, окаймляющих Внутригорный Дагестан на севере и востоке от Внешнегорного Дагестана (Гимринского, Салатау, Чонкатау, Шамхалдаг, Лес и др.), и простираются с северо-запада на юго-восток. Данный тип ландшафтов представлен 2 подтипами: нижнегорно- и среднегорно-лесными. Данные подтипы ландшафтов, начиная с восточной части Гимринского хребта, простираются параллельно друг другу в юго-восточном направлении в районе центральных и юго-восточных предгорий до р. Самур. Граница между ними проходит на высоте 1000-1100 м.

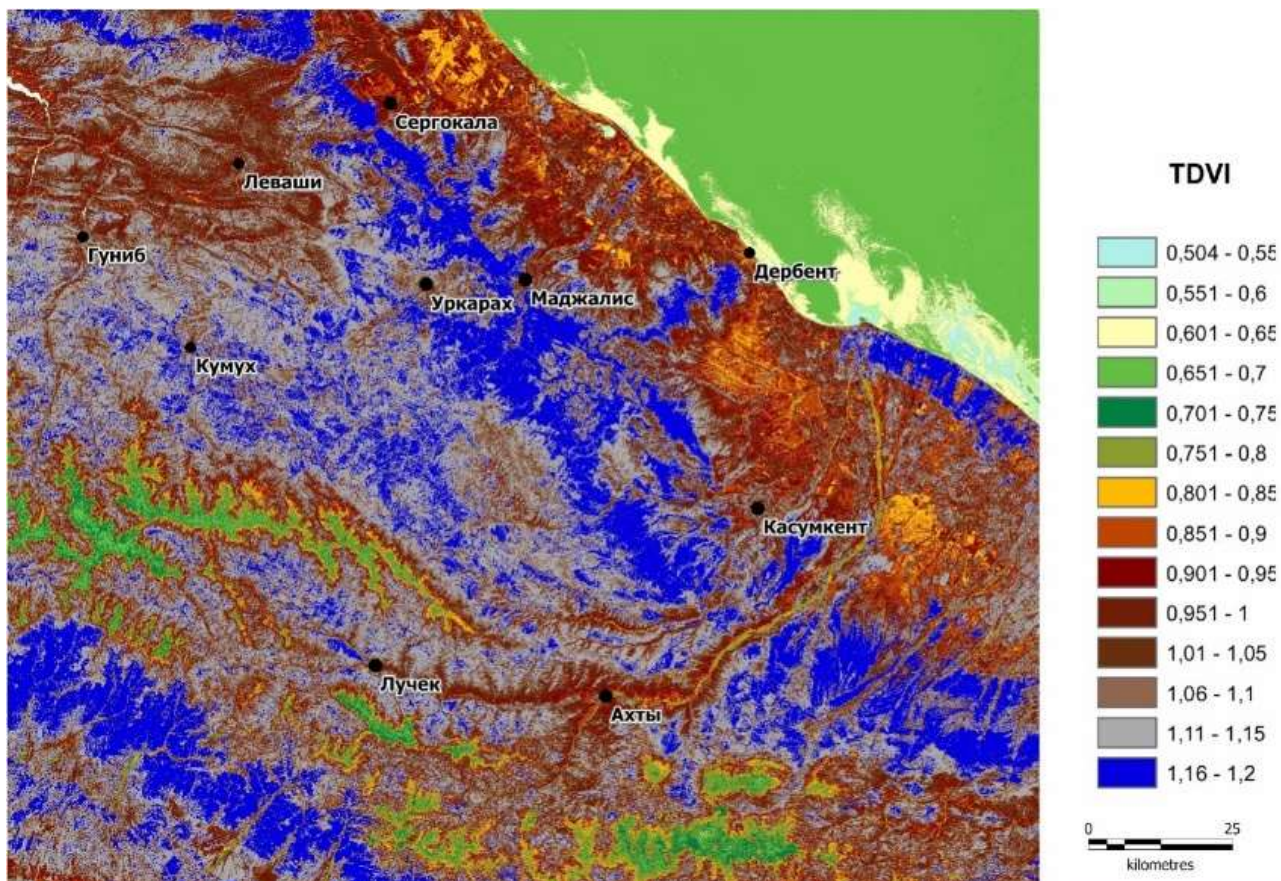
**Значения NDVI в пределах 0,5-0,7** соответствует участкам, на которых формируется довольно плотный растительный покров (травянистые или кустарниковые ПТК). В эту категорию индекса попадают ПТК, относящиеся как к высокогорным луговым (субальпийским) ландшафтам, так и к горным умеренным гумидным. В высокогорьях это преимущественно



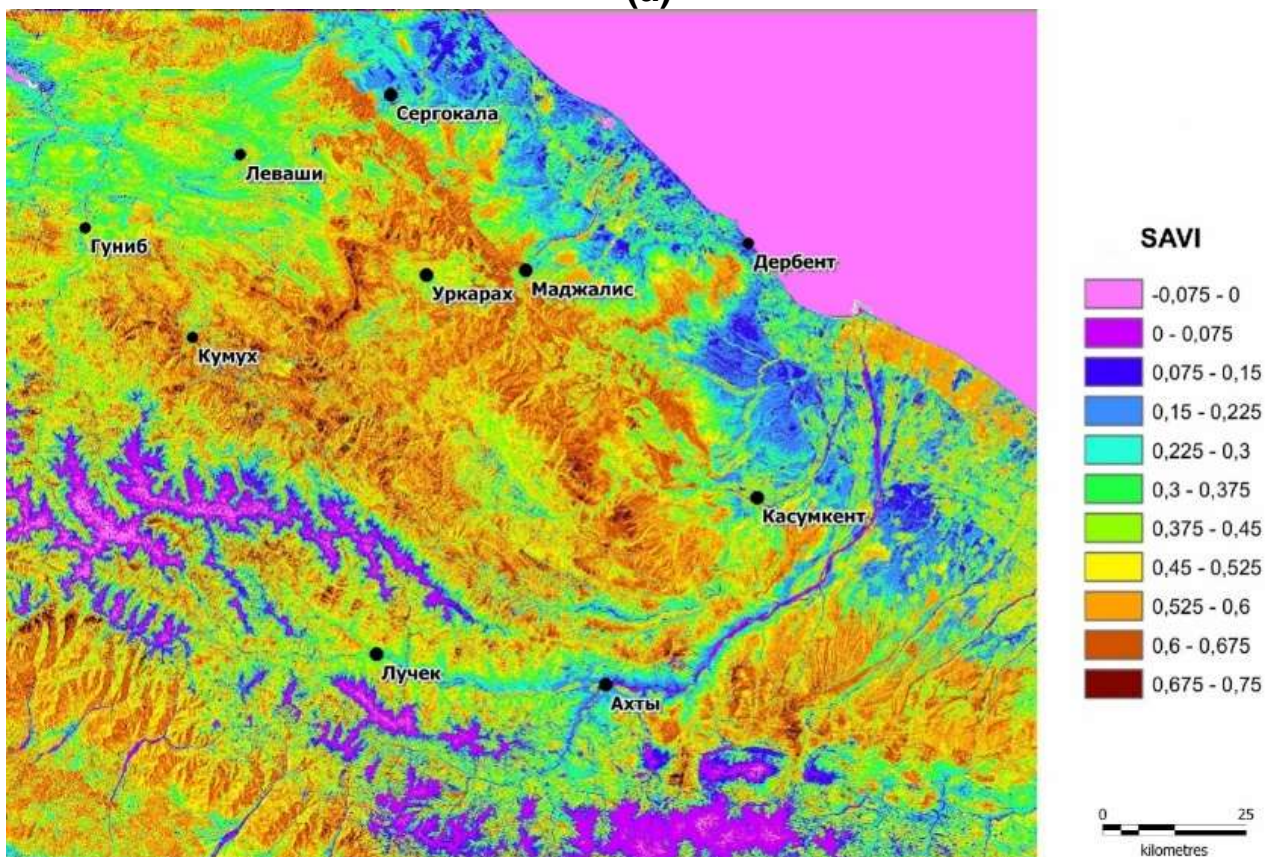
но заросли рододендрона кавказского или можжевельника поникшего, а в пределах горных умеренных гумидных, как уже отмечалось, – ПТК, находящиеся на границе между горно-лесными и горно-луговыми ландшафтам. Кроме того, в данную градацию попадают также березовые криволесья, характерные для горных холодноумеренных ландшафтов.

Наиболее интересно пространственное распределение **величины NDVI выше 0,7**, поскольку она соответствует различным степеням сомкнутости древостоев. Однозначная связь величины NDVI с древесным характером растительности отмечается при его значениях свыше 0,85 (см. рис. 2, снимок в естественных цветах). Величина индекса в интервале 0,80-0,85, которая в соответствии с градациями индекса (табл. 1) уже соответствует довольно хорошо сомкнутой древесной растительности, широко представлена в интервале высот от 1000 до 2000 м, однако в пределах этой части Северо-Восточного Кавказа леса столь широкого распространения не имеют, но потенциально могут произрастать. Наиболее точно соответствуют лесам территории с величиной индекса от 0,85. Данная градация NDVI наиболее характерна для горных умеренных гумидных и горных холодноумеренных ландшафтов. Однако характер лесов в пределах указанных ландшафтов различный: для горных холодноумеренных ландшафтов типичны сосновые и березовые леса, а для умеренных гумидных – широколиственные (дуб, бук, граб и др.). Также эта градация индекса хорошо индицирует леса на южном склоне Большого Кавказа и в пределах дельты Самура с более разнообразным породным составом лесов.

Пространственное распределение TDVI и SAVI по территории Северо-Восточного Кавказа иллюстрирует рис. 4. Как видно из представленных данных, эти индексы более точно, чем NDVI, отражают пространственное размещение луговых и лесных ПТК. Так, сопоставление рис. 2а и рис. 4а позволяет довольно точно выделять контуры лесной



(а)



(б)

Рис. 4. Пространственное распределение TDVI (а) и SAVI (б) по территории Северо-Восточного Кавказа

растительности. Однако, как в и случае NDVI, во Внутригорном Дагестане величина данного индекса соответствует крупным массивам древесной растительности, которые в реальности там не произрастают. Что касается SAVI, то этот вегетационный индекс слабо чувствителен к изменениям растительного покрова древесно-кустарникового типа. Однако данный индекс наиболее точно ограничивает ПТК с малыми запасами фитомассы, то есть позволяет довольно точно выделять ПТК с травянистым характером растительности.

### **Заключение**

Таким образом, спектральные индексы являются довольно информативными для дифференциации растительного покрова при выделении ландшафтов. Наиболее универсальным индексом является NDVI, который позволяет разграничивать разные физиономические типы растительности. Для уточнения границ в случае преобладания травянистой растительности хорошие результаты дает применение почвенного вегетационного индекса (SAVI). Для уточнения контуров древесной растительности, особенно лесов с высоким и плотным древостоем, лучшие результаты дает применение трансформированного разностного вегетационного индекса (TDVI). Данные индексы позволяют довольно точно выделять ПТК наиболее высоких классификационных рангов: типов и подтипов ландшафтов. Что касается выделения на их основе ПТК более низких рангов, то для этих целей необходимо учитывать особенности местоположения, обусловленные рельефом.

## Список использованных источников

1. Щукин И.С. Четырехязычный энциклопедический словарь терминов по физической географии / под ред. А.И. Спиридонова. М.: Советская энциклопедия, 1980. 703 с.
2. Ландшафтная карта Кавказа. Масштаб 1:1000000 / сост. Н.Л. Берущашвили, С.Р. Арутюнов, А.Г. Тедиашвили. Тбилиси, 1979.
3. Абдулаев К.А. Ландшафты горного Дагестана и их современное состояние. Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Ставрополь, 2008. 24 с.
4. Дышеков М.М. Ландшафты Карачаево-Черкесии в условиях современных изменений климата. Автореф. ... дис. канд. геогр. наук. Ставрополь, 2008.
5. Идрисова Р.А. Ландшафты Чеченской Республики: пространственная структура и особенности селитебной нагрузки. Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Нальчик, 2009. 24 с.
6. Солнцев Н.А. Избранные труды. Учение о ландшафте. М.: Изд. МГУ, 2001. 383 с.
7. Кравченко И.В., Галачиева Л.А., Джандубаева Т.З., Ибрагимов А.Д. Оценка морфологических особенностей рельефа Центрального Кавказа для анализа формирования ландшафтов // Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки. 2014. № 3 (28). С. 92-97.
8. Черепанов А.С., Дружинина Е.Г. Вегетационные индексы // Геоматика. 2011. № 2. С. 98-102.
9. <http://gis-lab.info/qa/ndvi.html>
10. [http://wiki.gislab.ru/w/Д33\\_для\\_экологических\\_задач\\_Часть\\_2:\\_Леса](http://wiki.gislab.ru/w/Д33_для_экологических_задач_Часть_2:_Леса)
11. Сутырина Е.Н. Дистанционное зондирование Земли. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2013. 165 с.
12. Кренке А.Н., Пузаченко Ю.Г. Построение карты ландшафтного покрова на основе дистанционной информации // Экологическое планирование и управление. 2008. № 2. С. 10-25.
13. Сочава В.Б. Введение в учение о геосистемах. Новосибирск: Наука, 1978. 319 с.
14. Patten B. Information storage and neural control (Tenth annual scientific meeting of the Houston neurological society). Illinois, 1963.
15. Гребенщиков О.С., Зимина Р.П., Исаков Ю.А. Природные экосистемы и вертикальная поясность // Альпы – Кавказ. Современные проблемы конструктивной географии горных стран. Научные итоги франко-советских полевых симпозиумов в 1974 и 1976 гг. М.: Наука, 1980. С. 179-194.
16. Родин Л.Е., Базилевич Н.И., Розов Н.Н. Биологическая продуктивность растительности земной суши и океана и факторы, её определяющие // Человек и среда обитания. Л.: Геогр. об-во СССР, 1974. С. 160-175.

17. Беручашвили Н.Л. Геофизика ландшафта. М.: Высшая школа, 1990. 287 с.
18. Беручашвили Н.Л. Кавказ: ландшафты, модели, эксперименты. Тбилиси: Изд-во ТГУ, 1995. 315 с.
19. Тедиашвили А.Г. Исследования фитомассы как ландшафтно-геофизического показателя ПТК и их состояний. Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Тбилиси, 1984.
20. Братков В.В. Пространственно-временная структура ландшафтов Большого Кавказа. Автореф. дис. ... докт. геогр. наук. Ростов-н/Д., 2002. 47 с.
21. Братков В.В. Фитомасса высокогорных луговых ландшафтов Большого Кавказа// Современная биогеография. Матер. Всерос. науч. телеконф. «Биогеография на рубеже XXI века», 11-20 мая 2000 г. / под ред. В.К. Рахилина, В.А. Шальнева. М.-Ставрополь: Институт истории естествознания и техники РАН, 2001.
22. Братков В.В., Салпагаров Д.С. Ландшафты Северо-Западного и Северо-Восточного Кавказа. М.: Илекса, 2001. 256 с.
23. Гулисашвили В.З., Махатадзе Л.Б., Прилипко Л.И. Растительность Кавказа. М.: Наука, 1975. 236 с.
24. Махатадзе Л.Б. Основные закономерности строения и распределения субальпийских лесов Кавказа // Лесоведение. 1968. № 5.