

# ДИСТАНЦИОННОЕ ИЗУЧЕНИЕ И КАРТИРОВАНИЕ ДНА МОРСКИХ МЕЛКОВОДИЙ

**К.М. Петров<sup>1</sup>, А.С. Унагаев<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Институт наук о Земле, Санкт-Петербургский государственный университет,  
Санкт-Петербург, Россия;

<sup>2</sup> Deep Planet Ltd., Лондон, Великобритания

Эл. почта: k.petrov@spbu.ru; a.unagaev@ucl.ac.uk

Статья поступила в редакцию 25.06.2023; принята к печати 12.09.2023

В обзоре рассмотрены природные факторы, технические средства дистанционного мониторинга и методология дешифрирования дистанционных изображений. К природным факторам, определяющим условия мониторинга, относятся: гидрометеорологический режим, рельеф, грунт и заросли подводной растительности. Формы подводного рельефа, грунты и связанные с ними донные биоценозы образуют закономерные сочетания, представляющие основу морфологических единиц ландшафта (подводных угодий и фаций). Последние, обладая характерными «физиономическими» особенностями, служат основным объектом изображения на аэрофото- и космических снимках. Техника дистанционного мониторинга дна морских мелководий предполагает использование аппаратуры, устанавливаемой на самолетах, беспилотных летательных аппаратах (БПЛА) и спутниках; особый вид представляет корабельная ультразвуковая (сонарная) съемка. Основы методологии использования дистанционных изображений были разработаны на примере дешифрирования крупномасштабных аэрофотоснимков дна морских мелководий. Ландшафтный метод дешифрирования основан на использовании закономерных взаимосвязей между компонентами природы: через опознавание и характеристику объектов, изобразившихся на снимках, логическим путем делают заключение о наличии и свойствах объектов и явлений, непосредственно на снимках не отобразившихся, но связанных с первыми естественными связями. Различают камеральный этап, подводные исследования и экстраполяцию дешифровочных признаков. Элементарные аэрофотографические эталоны представляют собой вырезки из аэрофотоснимков, характеризующие изображения донных природных комплексов ключевых участков. Эталоны используются для экстраполяции дешифровочных признаков на однотипные изображения. Межландшафтная экстраполяция проводится путем изучения ландшафтов-аналогов и переноса установленных дешифровочных признаков на территории не посещенных акваторий. В заключение предлагается программа комплексных ландшафтно-биономических исследований. Дистанционное изучение и картирование дна морских мелководий по предложенной программе обеспечит единообразие работ и сравнимость полученных результатов.

*Ключевые слова:* дистанционный мониторинг, морские мелководья, природные условия, технические средства, дешифрирование, ландшафтный метод.

## REMOTE STUDIES AND MAPPING OF THE SHALLOW SEABED

**K.M. Petrov<sup>1</sup>, A.S. Unagaev<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Institute of Earth Sciences, Saint-Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia;

<sup>2</sup> Deep Planet Ltd, London, UK

Email: k.petrov@spbu.ru; a.unagaev@ucl.ac.uk

Environmental factors, technical means for remote monitoring and methodology for interpreting remote sensing images are discussed. Environmental factors that determine the monitoring conditions include hydrometeorological regime, topography, soil, and thickets of submerged aquatic vegetation. Submarine topographical features, soils and associated seabed biocenoses form regular combinations that make the base of morphological landscape units (submarine landforms and facies). The latter, having specific physiognomic features, serve as the main target of photography in airborne and satellite images. The technique for remote monitoring the shallow seabed involves the use of equipment installed on aircraft, unmanned airborne vehicles (UAVs) and satellites; shipborne ultrasonic (sonar) survey is a special type of monitoring. The fundamentals of the methodology for using remote sensing images were developed on the basis of interpreting large-scale airborne photographs of the shallow seabed. The landscape method of image interpretation is based on the use of regular relationships between components of environment: through the identification and characteristics of targets appearing in the images, a logical conclusion is made about the presence and properties of objects and phenomena that are not directly displayed in the images, but associated with them via natural connections. There are the laboratory-based stage, submarine studies, and extrapolation of interpreting features. Elementary airborne photographic standards are fragments from airborne photographs, which characterize images of seabed nature complexes (SNC) of key areas. Standards are used to extrapolate interpreting features to images of the same type. The inter-landscape extrapolation is performed by studying analogous landscapes and transferring the established interpreting features to unvisited water areas. In conclusion, a program of comprehensive landscape-bionomic studies is proposed. Remote monitoring and mapping of the shallow seabed based on the proposed program will ensure uniformity of work and comparability of the results obtained.

*Keywords:* remote monitoring, sea shallow areas, environmental conditions, technical means, interpretation, landscape method.

## Введение

Значение морских мелководий в истории человеческой цивилизации огромно. Морские побережья – это наиболее населенные территории с активной хозяйственной деятельностью человека и развитой инфраструктурой. В береговой зоне создаются крупные портовые комплексы, гидротехнические защитные сооружения. По морскому дну прокладываются электрические и телеграфные кабели, продуктопроводы; здесь ведется разведка и добыча нефти и газа, разрабатываются россыпные месторождения. Широко развитие приобретают хозяйства марикультуры для выращивания водорослей, беспозвоночных животных и рыб. Наряду с этим, береговая зона моря представляет большую рекреационную ценность.

Современные океанологические исследования все больше приобретают экологическую направленность, которая особенно четко оформилась в европейских странах и США в 2001 году. При поддержке межправительственной океанографической комиссии ЮНЕСКО и научного комитета по океаническим исследованиям была учреждена первая международная исследовательская программа, положившая начало созданию международной Ассоциации морских ученых, изучающих геологические, биологические и океанографические процессы как индикаторы среды обитания сообществ донных организмов (GEOHAB = geo & habitat, <https://geohab.org/>). Ввиду хрупкости морских экосистем, в Европейском союзе и США разрабатываются программы морской экологической политики. Европейский союз в 2008 году принял Рамочную директиву о морской стратегии в области морской экологической политики (Directive 2008/56/EC, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/ALL/?uri=CELEX%3A32008L0056>). Принятая стратегия направлена на развитие мониторинга морской среды, которая является ценным наследием, требующим охраны биоразнообразия, необходимого для сохранения благоприятных экологических условий. Геологической службой США предложена Десяти-

летняя научная стратегия (2020–2030 годы) изучения и охраны прибрежных и морских ресурсов (<https://geonarrative.usgs.gov/cmhrp/>). Эта программа направлена на охрану биоразнообразия и повышение биологической продуктивности морских сообществ. В России разработана система законов, направленная на изучение рационального использования и охрану ресурсов шельфа.

Эффективным методом изучения и картирования морского дна в фотической зоне являются аэрокосмические методы, на больших глубинах, в афотической зоне – ультразвуковая, сонарная съемка. В статье рассматриваются природные, технические средства дистанционного мониторинга и методы дешифрирования аэрофотоснимков. В заключение предлагается программа комплексных ландшафтно-биологических исследований дна морских мелководий.

## Природные условия дистанционного мониторинга дна морских мелководий

Необходимым условием получения изображения морского дна служит прозрачность воды. В тропических широтах она наиболее высокая. В умеренных и арктических – существенно ниже. Оценка перспектив дистанционного мониторинга дна морских мелководий приведена в табл. 1. Из таблицы следует, что глубины до 20–25 м доступны съемке не менее чем у 50% мелководий Мирового океана.

В целом, к основным природным факторам, определяющим условия мониторинга, относятся: гидрометеорологический режим, рельеф береговой зоны моря, морфоструктуры, испытывающие новейшие и современные дифференцированные движения, морфологическая структура подводных ландшафтов.

### Гидрометеорологический режим

Главная особенность мониторинга морского дна состоит в том, что солнечные лучи, формирующие изображение, должны дважды пройти сквозь вод-

Табл. 1

Перспективы дистанционного мониторинга дна морских мелководий (по L.K. Lepley, 1968 [6])

Прозрачность (по Секки)	Доля протяженности берегов (%)	Распространение
0–5	15	В приустьевых участках крупных рек, дренирующих гумидные области
5–20	50	Типичны для прибрежных вод умеренных и арктических областей. Наблюдаются также в тропиках, в местах подъема глубинных вод
Более 20	35	Тропические области (где нет подъема глубинных вод), Средиземное море
Более 30	5	Малые Антильские о-ва, восточное Средиземноморье, о-ва юго-западной части Тихого океана

ную толщу, которая ослабляет яркость и контрастность подводных объектов. Неблагоприятное влияние воды усиливается при ухудшении ее прозрачности и увеличении глубины моря; чем скорее нарастают глубины и чем хуже прозрачность, тем меньше глубина и ширина мелководий, доступная мониторингу. Эмпирически установлено, что, в среднем, глубины, доступные для отображения, на одну треть превышают прозрачность моря, измеренную стандартным диском Секки. Косвенным показателем глубин, доступным фотографированию, служат заросли подводной растительности, которая формируется только при условии освещенности, необходимой для фотосинтеза; например, на побережье Кольского полуострова (Баренцево море) эта глубина равна 15 м.

Влияние толщи воды на качество изображения имеет выраженный спектральный ход: наибольший контраст изображения достигается в зеленой части спектра. Солнечные блики на поверхности моря маскируют изображение дна. Площадь, закрытая бликами, зависит от интенсивности волнения и высоты Солнца над горизонтом. Съемку рекомендуется проводить при относительно низком стоянии Солнца и волнении не более 2–3 баллов.

Таким образом, метеорологический и гидрологический режимы акваторий, их сезонный ход в значительной степени контролируют возможности мониторинга. Обстановка благоприятна, когда погода ясная, видимость хорошая, поверхность моря спокойная и чистая (свободная ото льда, пленок нефти и т. п.), прозрачность воды – высокая.

### Рельеф береговой зоны моря

Рельеф, глубина и площадь береговой зоны – основные параметры, которые следует учитывать, планируя мониторинг. Ближе всего к среднему положению нижней границы береговой зоны – изобата 30 м. Мелководья, ограниченные этой изобатой, наиболее доступны для мониторинга (табл. 2).

### Морфоструктуры

Новейшие и современные дифференцированные движения играют ведущую роль в формировании рельефа морских окраин платформ и орогенов. Морфоструктуры контролируют рельеф побережья, контур береговой линии и приглубость подводного склона. Различают продольные берега, у которых оси складок располагаются вдоль береговой линии, и поперечные берега – оси складок идут по нормали к берегу. Для растущих продольных берегов характерно формирование берегового обрыва (клифа), крутого подводного абразионного берегового склона. Мониторингу доступна только узкая полоса мелководий. У берегов поперечного типа оси растущих складок продолжают в море, образуя систему мысов, островов и заливов. Мониторингу доступна значительная площадь мелководий. Каменистые рифы, банки и тому подобное, обросшие водорослями и беспозвоночными в сочетании с равнинными участками, сложенными песчано-ракушечными наносами, создают контрастный рисунок, легко распознаваемый в процессе мониторинга.

На месте тектонических прогибов происходит накопление мощной толщи рыхлых четвертичных отложений и формируются берега с песчаным пляжем и широкой подводной аккумулятивной равниной. В целом подводные аккумулятивные равнины получают монотонное изображение, постепенно сливающееся с толщей воды. На глубине до 5 м в зоне активного волнового воздействия получают четкое изображение подводные береговые валы, косы и другие аккумулятивные формы рельефа.

### Морфологическая структура подводных ландшафтов

Формы подводного рельефа, грунты и связанные с ними донные биоценозы образуют закономерные сочетания, представляющие основу донных природных комплексов (ДПК). В ландшафтоведении они образу-

Табл. 2

Площади морских мелководий (тыс. кв. км)

Море	Ступени глубин, м		
	0–20	20–50	0–50
Азовское	–	–	41
Северная часть Черного моря	17	30	47
Каспийское	148	52	200
Восточная часть Балтийского моря	25	30	55
Баренцево	44	68	112
Охотское	61	98	159
Северная часть Японского моря	8	16	24

ют систему внутриландшафтных морфологических единиц – фаций и угодий [4]. Последние обладают характерными физиономическими особенностями и служат основным объектом изображения на аэрофото- и космических снимках.

В качестве примера приведем ландшафтную карту Апшеронского архипелага (рис. 1).

Приведем краткое описание и характерные аэрофотоснимки некоторых угодий.

*Угодья скал и камней* представлены абразионно-скульптурными формами рельефа, обусловленными выходами пластов крепко сцементированных пород в коренном залегании. На аэрофотоснимке (АФС) они получают характерное изображение, отображающее простирающиеся пласты, очерчивающих крыло антиклинальной складки (рис. 2).

Угодья скал и камней являются биотопом литофильных гидробионтов: водорослей и беспозвоночных животных (рис. 3).

*Угодья полей ракушки* представлены песчано-ракушечными наносами, покрывающими абразионно-аккумулятивную равнину. На АФС они получают монотонное светло-серое изображение, осложненное аккумулятивными формами рельефа (рис. 4).

Поля ракушки занимают наибольшую площадь в ландшафте Апшеронского архипелага (рис. 1). Благодаря отсутствию берегового стока и поступления терригенного материала с суши основным компонен-

том отложений является автохтонный биогенный материал – ракушка (рис. 5).

*Угодья лугов морских трав* формируются в прозрачной воде на глубине до 5–6 м под защитой от волн и течений выступами берега, островами и каменистыми грядами. Они получают характерное изображение на АФС (рис. 6).

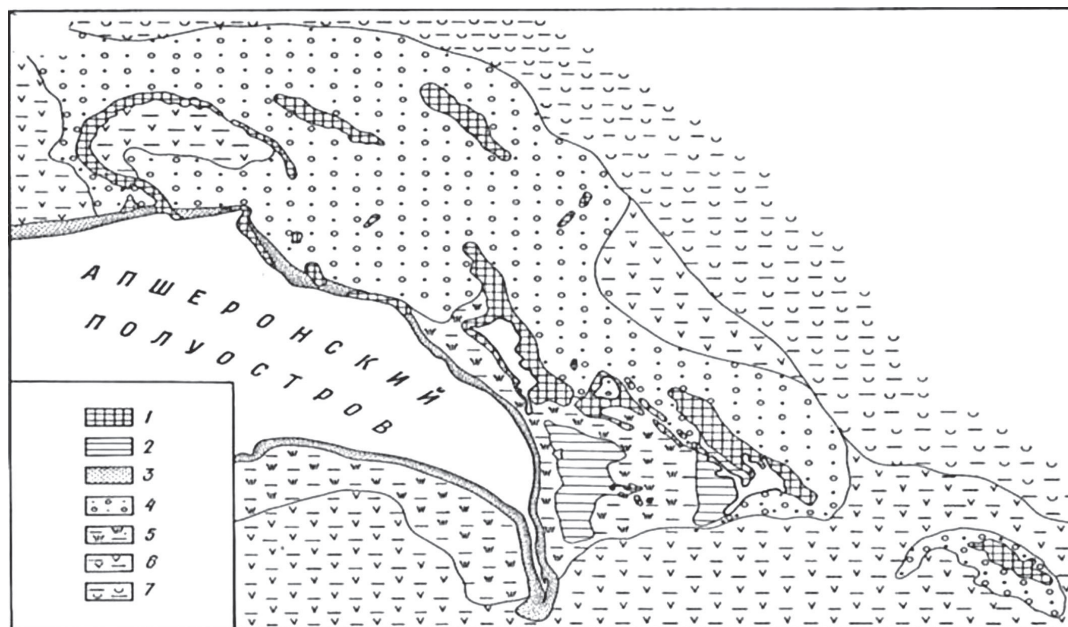
В угодьях лугов морских трав господствующими жизненными формами являются травянистые корневищные растения *Zostera minor* и *Ruppia maritima*, образующие заросли с высокой, иногда сплошной сомкнутостью на песчано-илистых с примесью ракушки грунтах (рис. 7).

### Технические средства дистанционного мониторинга

Техника дистанционного мониторинга дна морских мелководий предполагает использование аппаратуры, устанавливаемой на самолетах, беспилотных летательных аппаратах (БПЛА) и спутниках; особый вид представляет корабельная ультразвуковая (сонарная) съемка.

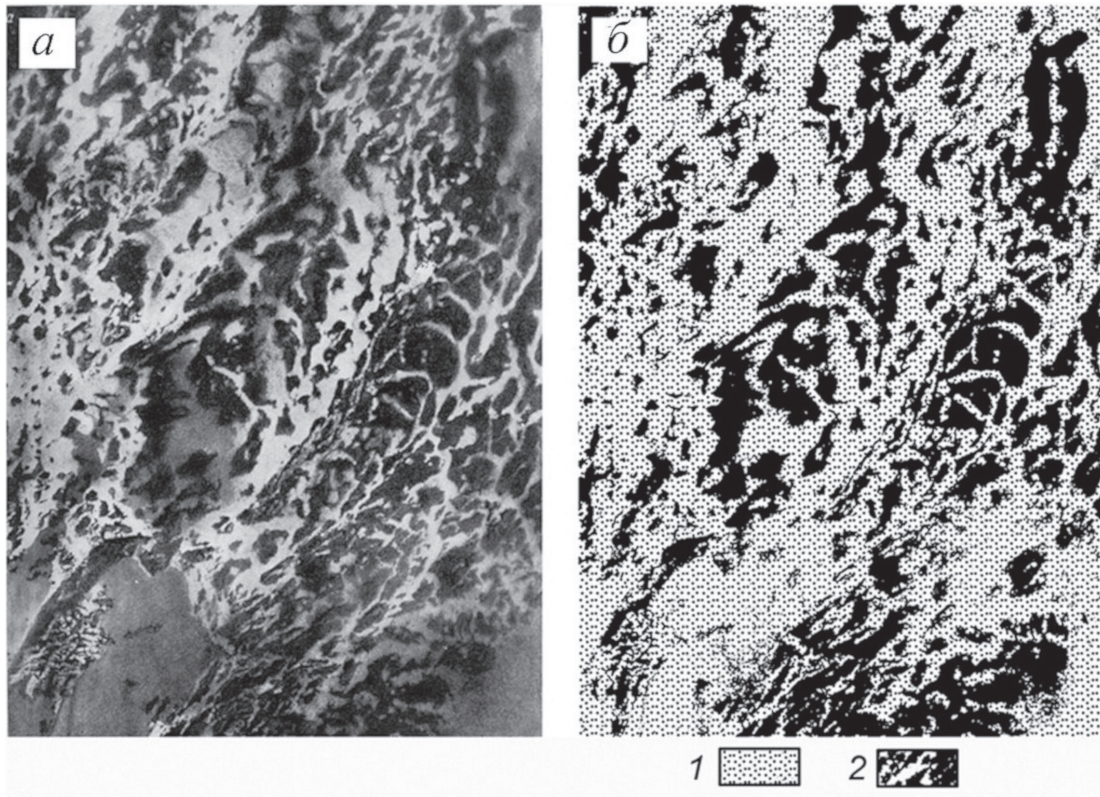
### Аэрофотосъемка (АФС)

Начало научно-практического применения АФС в России относится к 60-м годам XX века, когда возникла потребность геологического изучения и картирования мелководий Апшеронского архипелага



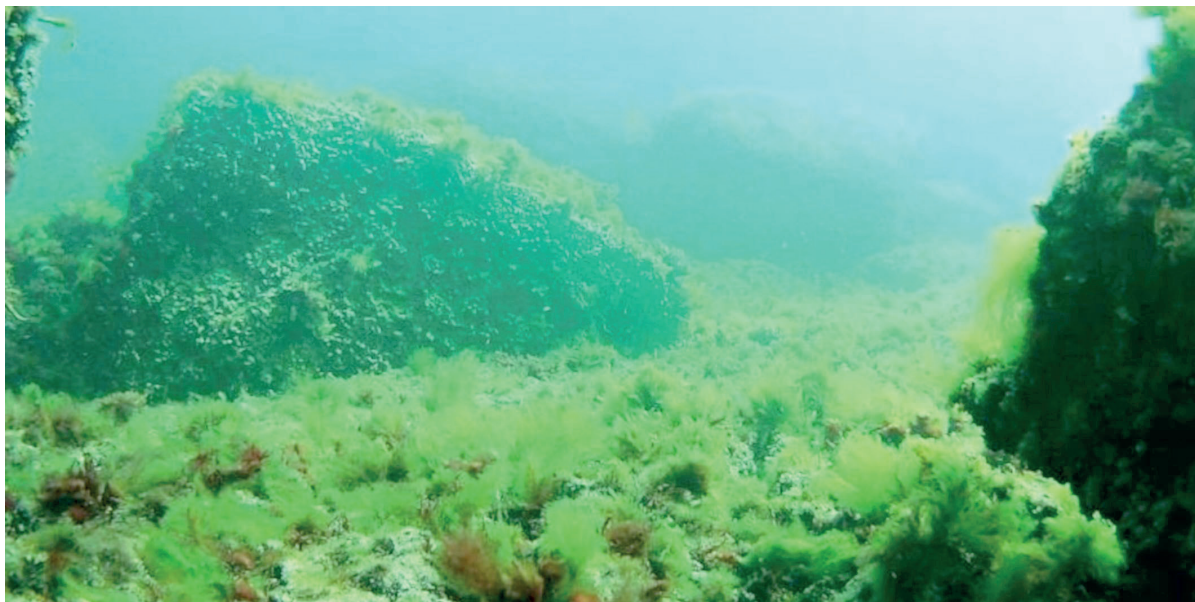
**Рис. 1.** Ландшафтная карта Апшеронского архипелага (Каспийское море) [2].

Условные обозначения. Подводные угодья: 1 – скал и камней; 2 – равнин; покрытых литифицированной коркой; 3 – береговых валов; 4 – полей ракушки; 5 – лугов морских трав; 6 – илистых равнин береговой зоны; 7 – илистых равнин за пределами береговой зоны на глубине свыше 20 м



**Рис. 2.** Аэрофотоизображение угодий скал и камней и его геологическая интерпретация. Апшеронский архипелаг (Каспийское море) [2]:

а – изображение каменистых гряд, очерчивающих крыло антиклинальной складки. АФС, м-б 1 : 15 000; б – преобразование аэрофотоизображения в графическую форму, основу геологической карты. 1 – современные отложения, песчано-ракушечные наносы; 2 – пласты коренных пород, очерчивающих крыло антиклинальной складки



**Рис. 3.** Угодье скал и камней: вершина банки, обросшая водорослями. Фитоценоз зеленых водорослей *Cladophora* + *Enteromorpha* и красных водорослей *Seramnum elegans* + *Laurencia caspica* (подводная фотография). Из: <https://travel2baku.com/ru/ru-this-is-azerbaijan-diving-azerbaijan/>

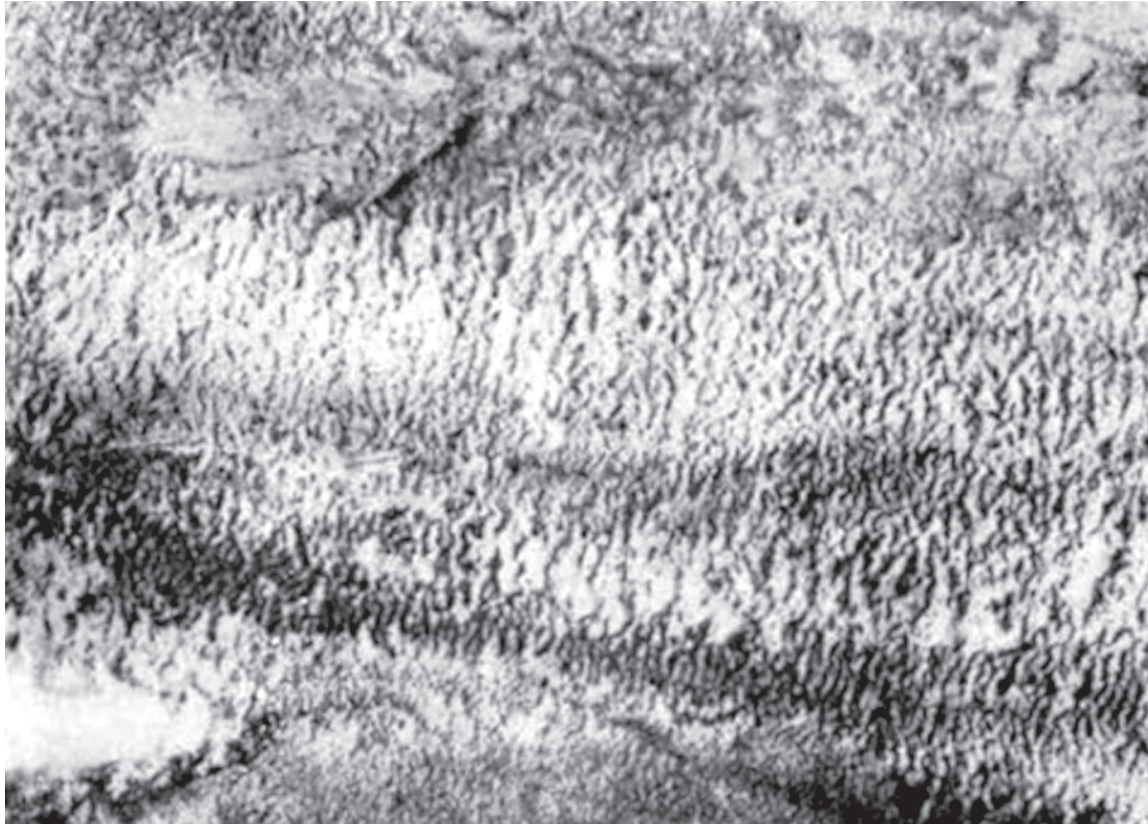


**Рис. 4.** Изображение поля ракуши, осложненного плоскими подводными валами. Апшеронский архипелаг (Каспийское море). Глубина 10 м. АФС, масштаб 1 : 15 000 [2]

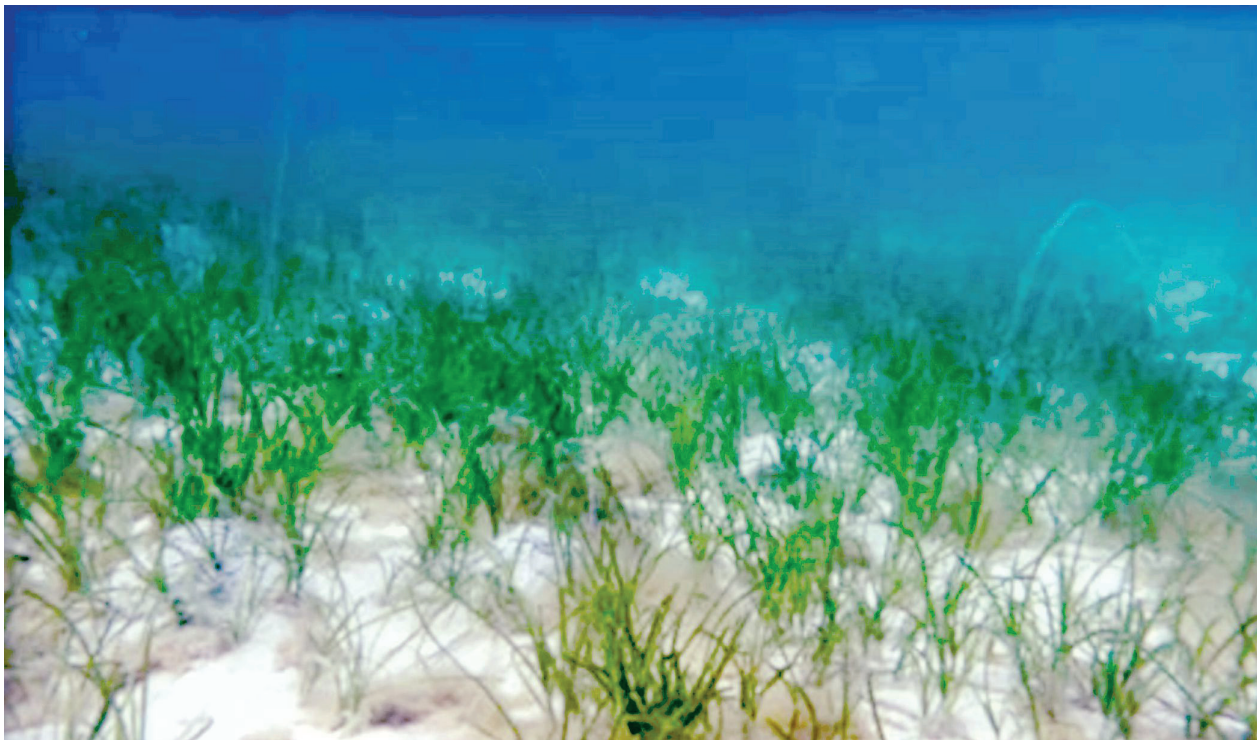


**Рис. 5.** Угодье поля ракуши: створки моллюсков *Didacna* sp., *Hyranis* sp., *Dreissena elata*, *Mytilaster lineatus* (подводная фотография К.М. Петрова)





**Рис. 6.** Угодья лугов морских трав. Апшеронский архипелаг (Каспийское море). Глубина 6 м. АФС, масштаб 1 : 5000 [2]



**Рис. 7.** Угодье лугов морских трав, фитоценоз *Zostera minor*. Подводная фотография из: <https://www.shutterstock.com/ru/video/clip-1092936653-undersea-landscape---pov-scuba-diving-over>

(Каспийское море) с целью разведки нефтяных месторождений. Технические средства и природные условия АФС были разработаны в Лаборатории аэрометодов АН СССР [1, 2].

Съемка велась длиннофокусными аэрофотоаппаратами ( $f = 40$  мм) с углом зрения около  $80^\circ$ . Применялась высокочувствительная контрастная аэропленка, сенсibilизированная к зеленой части спектра. Этим требованиям удовлетворяла изохроматическая аэропленка АС-1, применявшаяся в рентгеноскопии. В процессе съемки использовался желтый светофильтр ЖС-12 (а при съемке с высоты более 1000–1200 м – светофильтр ЖС-18); иное значение имели поляризационные светофильтры, с их помощью пол-

ностью или частично гасилось изображение солнечных бликов на поверхности моря.

Плановая АФС проводилась в масштабах 1 : 5000–1 : 10000. Снимки монтировались в накидные монтажи, из которых изготавливались фотосхемы, покрывавшие значительные акватории мелководий (рис. 8).

Кроме съемки на черно-белую пленку был получен опыт использования спектрзональных пленок. Последние имеют высокую чувствительность как в видимой, так и инфракрасной зонах спектра. Несмотря на то что толщина воды поглощает инфракрасное излучение, на спектрзональных снимках появляется важный дополнительный дешифровочный признак, цвет, для надводных объектов (рис. 9).

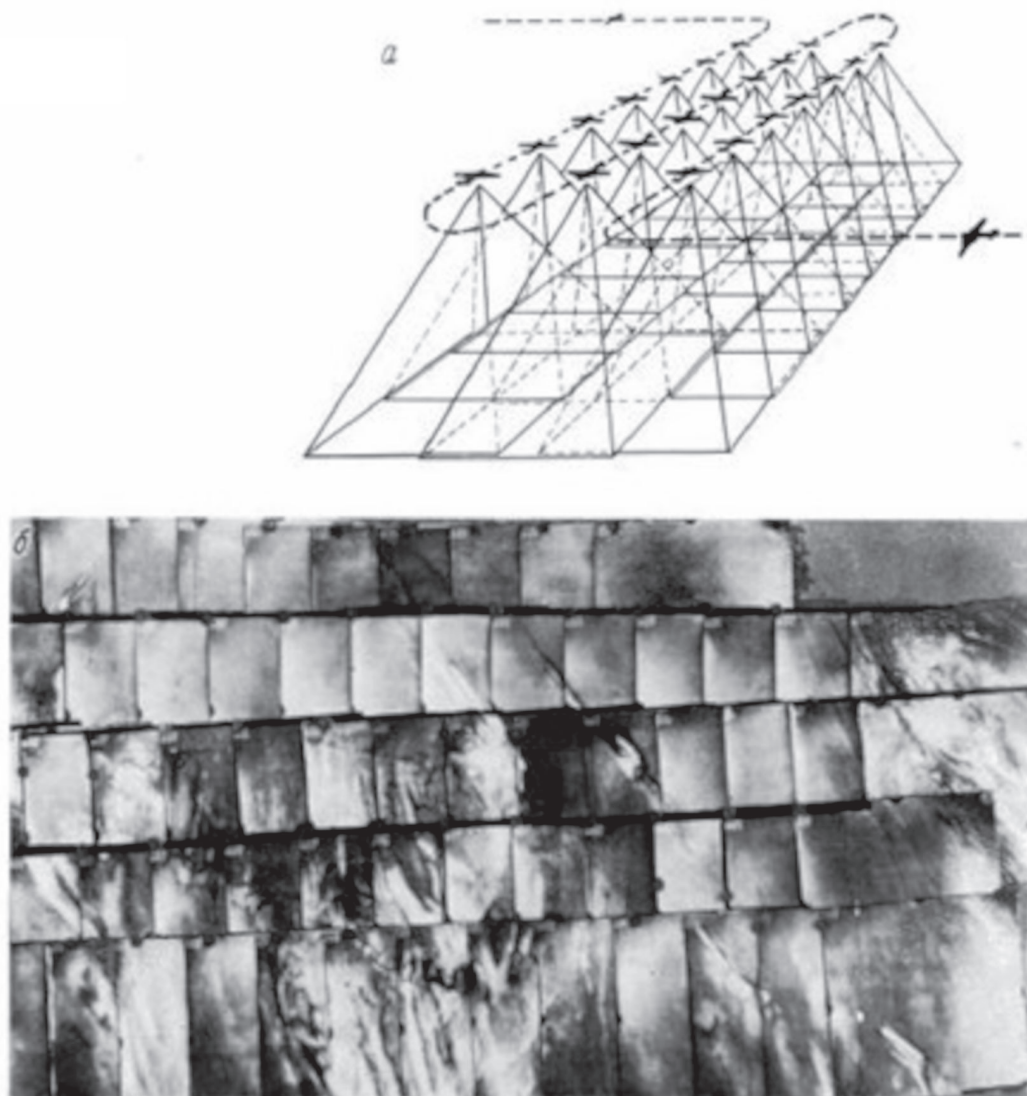
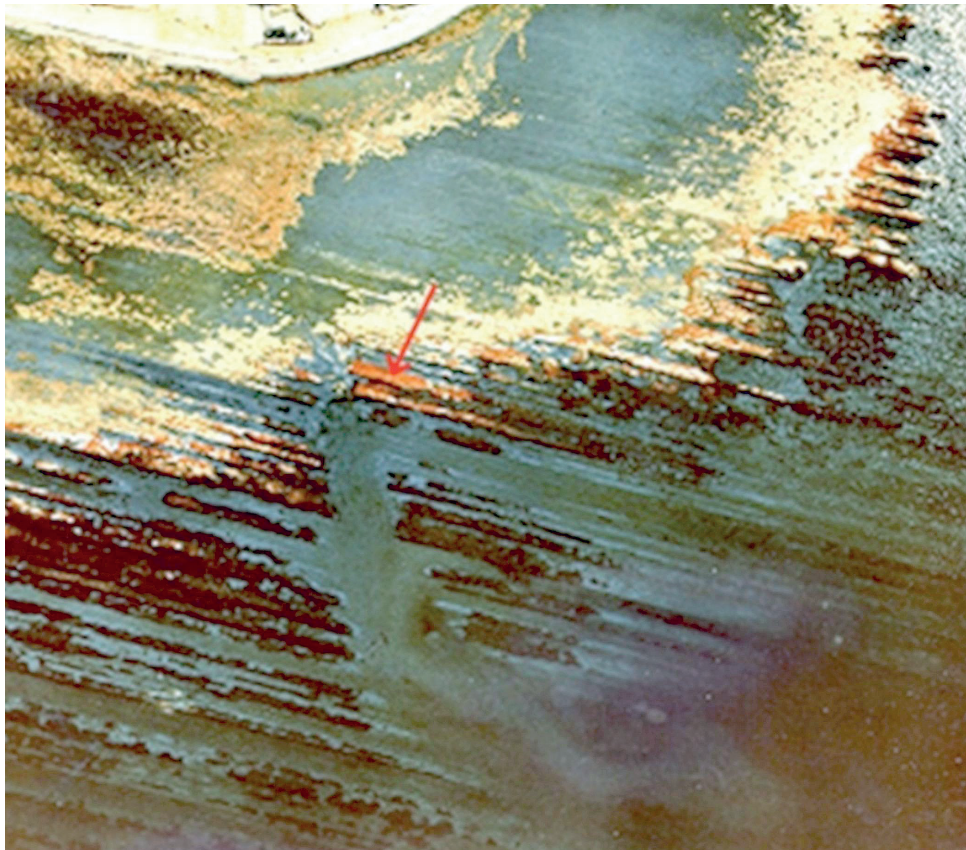
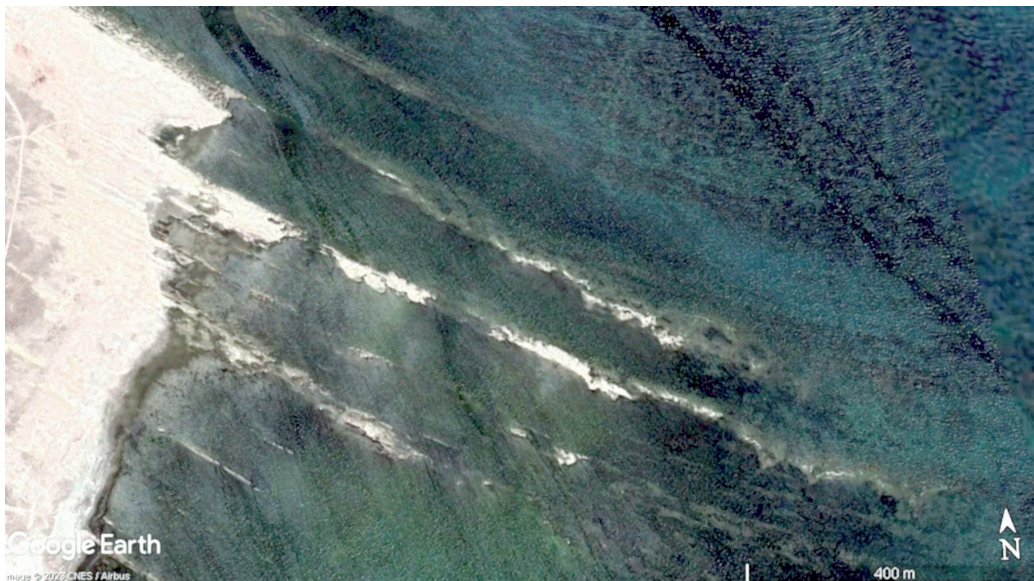


Рис. 8. Схема плановой АФС (а) и накидного монтажа снимков (б) [2]

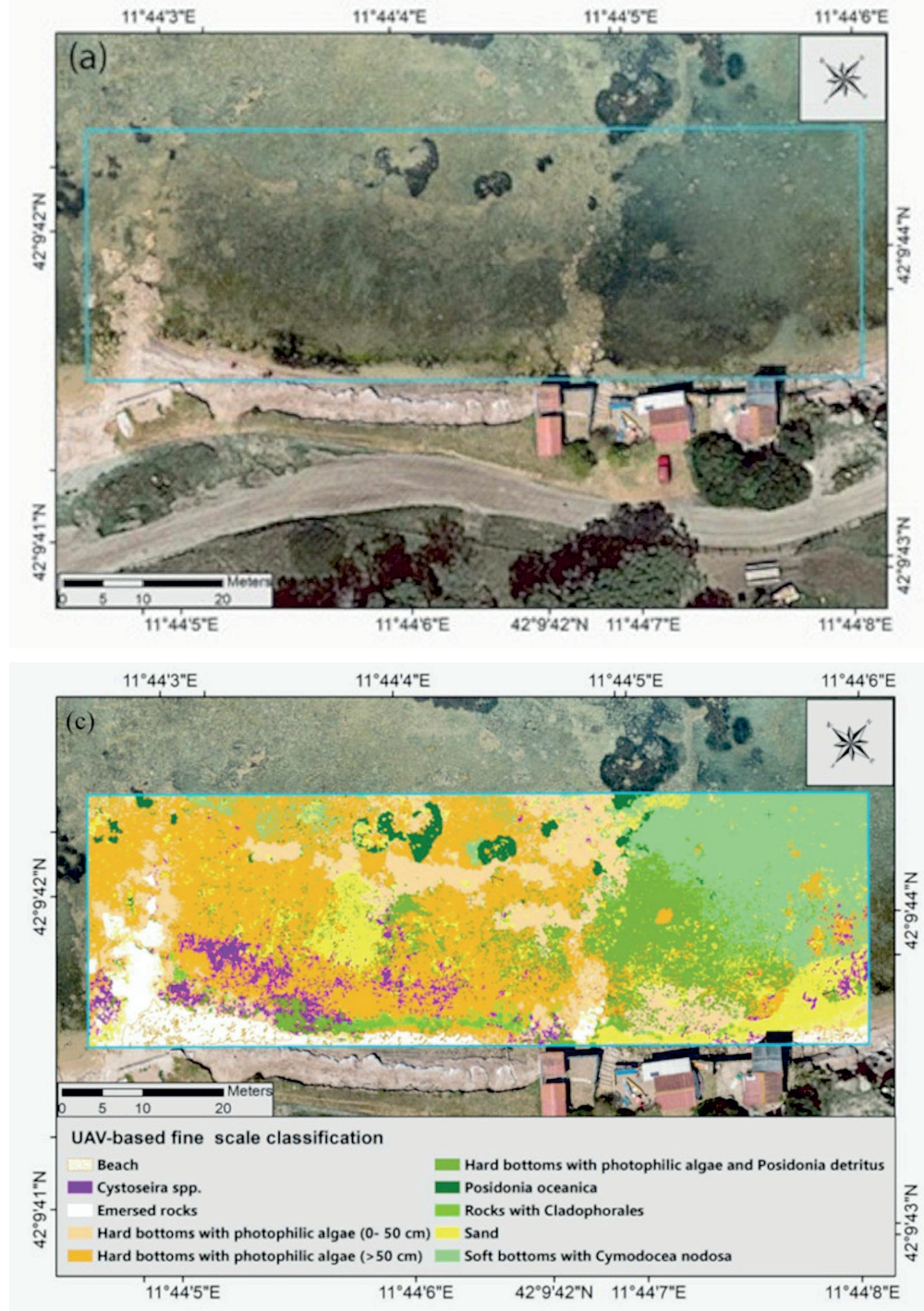




**Рис. 9.** Изображение высокого берега, к которому примыкает низкая терраса, где расположены дома и проходит дорога; далее следует широкая литоральная зона (осушка), к ней примыкает абразионный скульптурно-грядовый склон. Четкое изображение в виде темно-коричневых полос получили заросли ламинарии на грядах. С увеличением глубины толща воды нивелирует цвет, и изображение дна становится монохроматическим. Западный берег южного Сахалина. Спектрозональный аэрофотоснимок, масштаб 1 : 10000. (Архив К.М. Петрова)



**Рис. 10.** Изображение гряд, обросших водорослями и беспозвоночными животными, очерчивающих фрагмент антиклинальной складки на подводном береговом склоне о. Пираллахи. Апшеронский архипелаг (Каспийское море). Космическое изображение из Google Earth, на базе композита изображения Airbus Pleiades, разрешение 0,5 м



**Рис. 11.** Применение материалов крупномасштабной аэрофотосъемки дна морских мелководий, полученных с беспилотного летательного аппарата DJI Mavic 2 Pro цифровой камерой Hasselblad L1D-20c в RGB-диапазоне [9]. а) Мозаика аэрофотоснимков масштаба 1 : 500 мелководья Тирренского моря у берегов Италии; с) картосхема подводной растительности и грунтов, составленная по материалам дешифрирования АФС.

Условные обозначения. Левая колонка (сверху вниз): 1 – пляж; 2 – *Cystoseira* spp.; 3 – надводные скалы; 4 – светолюбивые водоросли: красные (*Jania rubens*, *Corallinales*), бурые (*Padina pavonica*, *Halopteris scoraria* и *Dictyota dichotoma*) на каменистых грунтах на глубине 0–50 см; 5 – те же светолюбивые водоросли на каменистых грунтах на глубине свыше 50 см. Правая колонка (сверху вниз): 1 – те же светолюбивые водоросли на каменистых грунтах на глубине свыше 50 см с участием листьев и корневищ морской травы *Posidonia oceanica*; 2 – морская трава *Posidonia oceanica* на песчаном грунте; 3 – каменистый грунт с зелеными водорослями *Cladophorales*; 4 – песчаный грунт; 5 – Морская трава *Cymodocea nodosa* на песчано-илистом грунте

### Космическая съемка

Во второй половине XX века наступила эпоха мониторинга Мирового океана из космоса [5, 7, 8]. Основными преимуществами космической съемки являются: значительная площадь, охватываемая съемкой; высокое разрешение – до 0,3 м; мультиспектральная съемка в более чем 10 зонах спектра; возможность проводить многолетний мониторинг. Общедоступными интернет-сервисами, предоставляющими космические изображения, являются Google Maps, Esri, Bing и др. (рис. 10). Например, фрагмент композита КС из Google Earth отображает рисунок дна морских мелководий, образованный грядами каменистых пород. Специальная съемка и изображения высокого качества могут быть заказаны в ряде компаний, например, Maxar, Airbus или PlanetLabs.

### Съемка с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА)

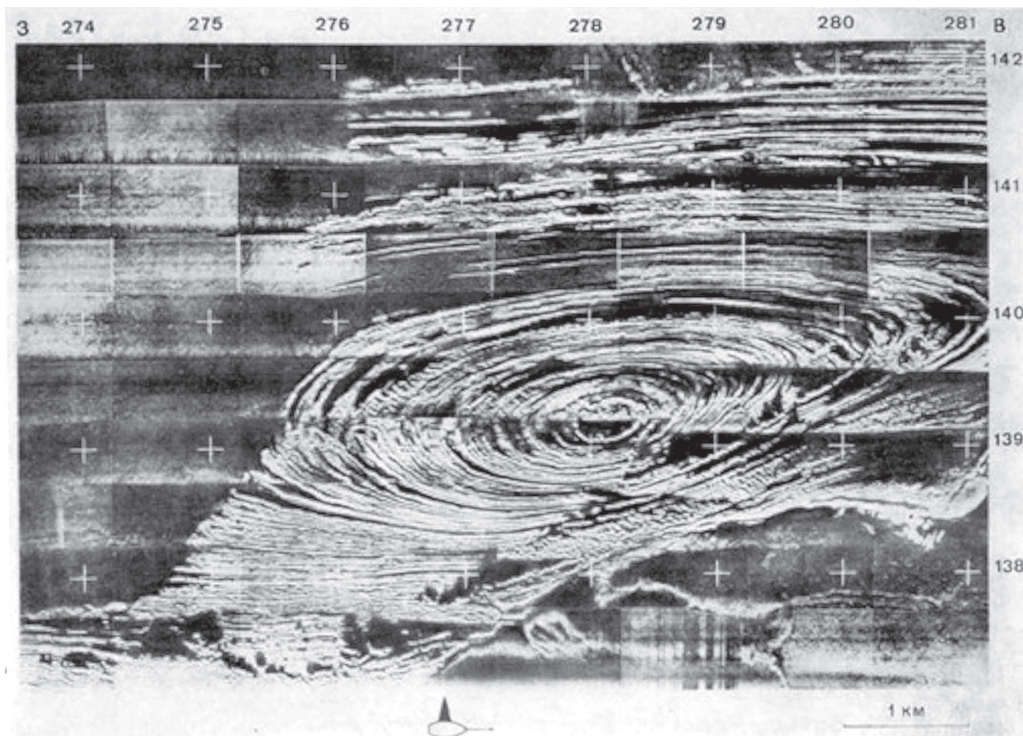
В XXI веке широкое развитие в целях экологического мониторинга морских мелководий получает съемка с БПЛА. Полет БПЛА осуществляется по заданной программе или управляется дистанционно. Как правило, съемку выполняют для мониторинга небольших акваторий в крупном масштабе. Цифровые камеры позволяют получать многоспектральные изображения с высоким разрешением. БПЛА снаб-

жены системой инерциального позиционирования (IMU) и системой спутниковой навигации (GPS), что позволяет определять положение камеры в полете с геодезической точностью до 3 см в плане и по высоте. Эти данные берутся за основу для координирования снимков на местности. В качестве примера приведем результаты дистанционного мониторинга участка дна в Тирренском море с помощью БПЛА DJI Mavic 2 Pro (рис. 11).

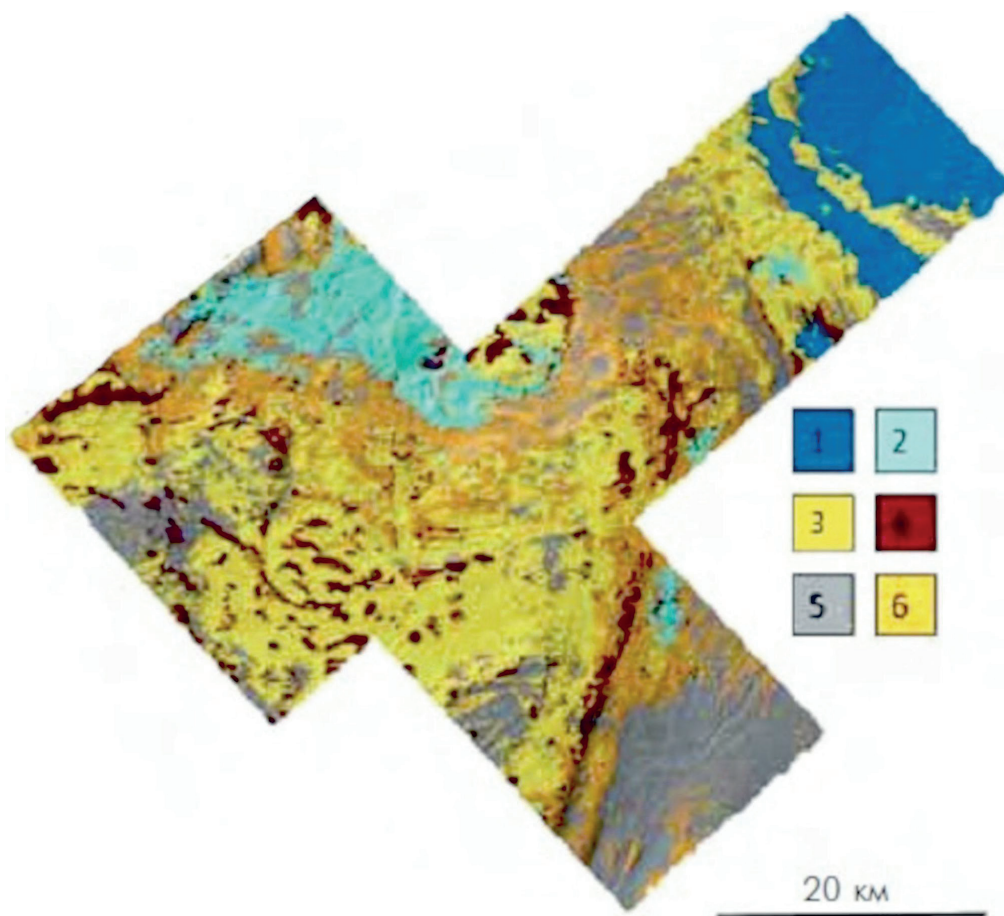
### Сонарные системы (Sound Navigation and Ranging)

Применяются для съемки морского дна на глубинах, недоступных оптическим методам. Сонарное изображение получают с помощью фиксации отраженного ультразвукового сигнала. Современные системы позволяют монтировать отдельные снимки в ортогональные схемы значительных участков морского дна (рис. 12). Эти схемы несут изображение важного экологического фактора – форм рельефа и типов грунта морского дна.

Интенсивность отражения звукового сигнала меняется в зависимости от плотности грунта: от скальных пород отражение максимальное, от илистых – минимальное. Это позволяет настраивать сонарные системы таким образом, что разные типы грунта получают специфическое цветное изображение.



**Рис. 12.** Сонарное изображение антиклинальной складки на дне Бискайского залива, глубина около 40 м. Хорошо видны скульптурно-грядовые формы рельефа, развитые на месте отпрепарированной абразией толщи флишеобразно переслаивающихся пород (материалы Французского нефтяного института)



**Рис. 13.** Донные природные комплексы ландшафта норвежского сектора шельфа Баренцева моря, по данным MAREANO (<http://www.imr.no/english/activities/mareano>).

Условные обозначения: 1 – глинистый ил, типичная фауна: *Pelosina/Asbestopluma* spp.; 2 – опесчаненный ил, типичная фауна: крупные губки; 3 – песок, типичная фауна: *Ceramaster/Stichopus* spp.; 4 – песок с гравием, типичная фауна: *Stylocordyla/Aphrodite* spp.; 5 – камни с песком, типичная фауна: *Phakellia/Axinella* spp.; 6 – скопления крупных камней, типичная фауна: *Polymastia/Porania* spp.

Например, на рис. 13 приведена ландшафтная карта полигона, расположенного в норвежском секторе Баренцева моря на глубине более 200 м. По характеру мозаики ДПК в центральной части полигона выделяется ландшафт с преобладанием камней, гравия и песка (ДПК 3, 4, 5, 6). На северо-западе и северо-востоке с ним граничат более глубоководные ландшафты, в которых преобладают ДПК 1 и 2 с илистым грунтом.

Для дешифрирования сонарных изображений применяются обитаемые подводные аппараты, телевизионная и автоматическая фотосъемки.

### Дешифрирование дистанционных изображений

На плановых снимках морское дно получает подчас четкое и детальное изображение. Однако необычный ракурс делает снимок даже крупного масштаба непонятным для его интерпретации. Основы методологии

использования дистанционных изображений были разработаны на примере дешифрирования крупномасштабных аэрофотоснимков дна морских мелководий [2]. Простейший метод дешифрирования можно назвать предметным.

*Предметный метод дешифрирования* заключается в сравнительном анализе элементов изображения на АФС с объектами на морском дне. Например, АФС участка мелководий Апшеронского архипелага (Каспийское море) характеризуется рисунком, образованным темными пятнами на светло-сером фоне (см. рис. 2). В результате подводных исследований установлено, что темные пятна на АФС соответствуют отпрепарированным абразией пластам коренных пород, обросшим красными водорослями, светлый тон полю песчано-ракушечных отложений (рис. 14).

Для глубокой комплексной интерпретации дистанционных изображений применяется ландшафтный метод дешифрирования.



**Рис. 14.** Подводные уголья, определяющие формирование темных и светлых деталей изображения на АФС (подводная фотография К.М. Петрова). Описание в тексте

*Ландшафтный метод дешифрирования* основан на использовании закономерных взаимосвязей между компонентами природы: через опознавание и характеристику объектов, изобразившихся на снимках, логическим путем делают заключение о наличии и свойствах объектов и явлений, непосредственно на снимках не отобразившихся, но связанных с первыми естественными связями. Геометрические и спектральные особенности деталей изображения могут служить дешифровочными признаками, несущими информацию как и об отдельных компонентах природы, так и о ДПК в целом. Рассмотрим ландшафтный метод дешифрирования более подробно на примере разработки дешифровочных признаков для интерпретации крупномасштабных черно-белых АФС. Существует закономерная связь определенных типов и форм подводного рельефа, петрографических особенностей коренных пород, геолого-структурного строения, грунтов и группировок донных биоценозов с ДПК и изображениями последних на снимках.

При разработке дешифровочных признаков различают камеральный этап, подводные исследования и экстраполяцию дешифровочных признаков.

*Камеральный этап.* До начала морских работ на снимках исследуемой акватории оконтуриваются основные типы рисунков и создается предварительная контурная основа ДПК, получающих характерное изображение. Соответствующий ему участок на местности принимается за ключевой. Разработанные на нем дешифровочные признаки распространяются на все однотипные изображения.

*Морские исследования.* Используя современные навигационные средства, последовательно посещают намеченные ключевые участки и описывают их в процессе водолазного обследования. Работы организуются методом описания точек и заложения ландшафтных профилей. Рисунок аэрофотоизображения ключевого участка подвергают детальному описанию, в ходе которого разрабатываются дешифровочные признаки. Для соблюдения единообразия и определенного по-

рядка в наблюдениях рекомендуется описание ключевого участка вести по следующей программе: номер профиля, номер станции, географическая привязка, колебания глубин, название природного комплекса. При описании ДПК отмечаются:

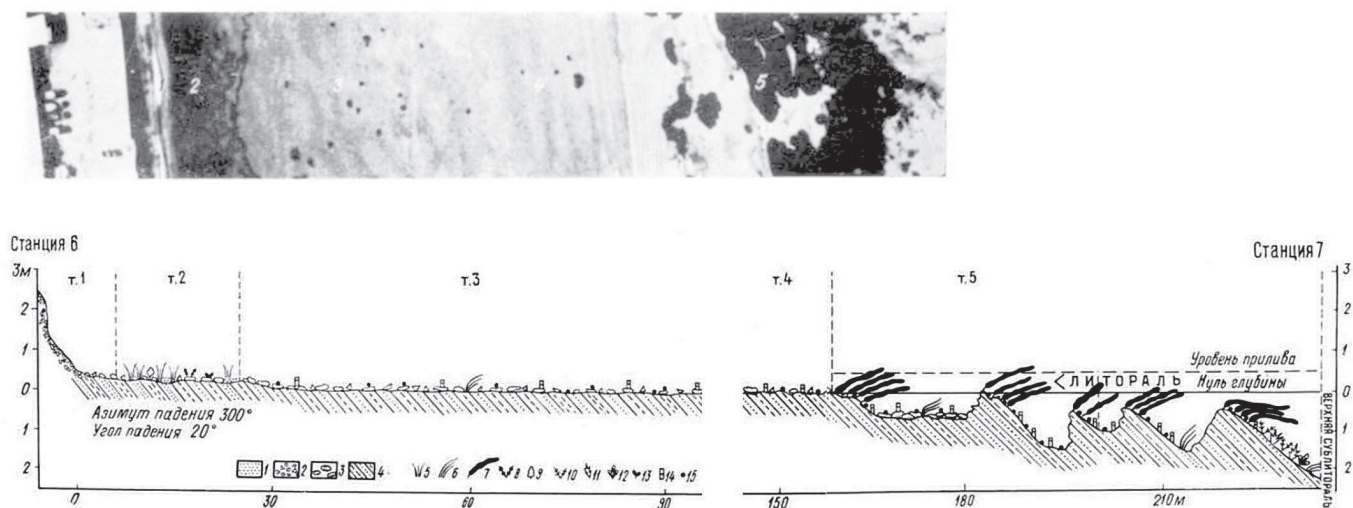
- в местах абразионно-скульптурных форм рельефа на месте выхода пластов коренных пород указываются их петрографический состав, форма, высота и простирание гряд;

- в местах аккумулятивного рельефа описываются формы, образованные в результате деятельности волновых процессов (береговые валы, косы и т. п.), отмечается последовательная смена гранулометрического состава осадков по профилю;

- при описании фитоценозов (растительных сообществ) отмечаются проективное покрытие, высота, обилие и состав макрофитов (зеленых, бурых, красных водорослей и морских трав), при описании зооценозов (сообществ животных) отмечается состав нектобентоса, бродячие и свободнолежащие на дне формы, формы сверлильщиков, формы, обрастающие каменистый грунт (сессильная фауна), формы, закапывающиеся в рыхлый грунт (инфауна).

Чтобы наглядно графически отобразить пространственное сопряжение основных компонентов географических комплексов, связать их с особенностями изображения на аэрофотоснимках, закладываются ландшафтные профили. Их основу составляет батиметрический профиль (как правило, его направление совпадает с нормалью к береговой линии, вкрест изобат). Условные знаки обозначают геолого-структурное строение, грунты, донные биоценозы. Вертикальные линии, разделяющие линию профиля на серию отрезков, показывают границы ДПК. Описание выполняется вдоль мерного шнура. В качестве примера приведем ландшафтный профиль верхней части подводного берегового склона и фрагмент АФС, соответствующий линии профиля (рис. 15).

При дешифрировании подводных ландшафтов береговой зоны основу батиметрического профиля составляет эхограмма рельефа. Характерные аэрофотоизображения принимаются за ключевые участки, которые обследуются в процессе водолазных работ. Эти изображения считаются аэрофотографическими эталонами, которые прилагаются к ландшафтному профилю (рис. 16).



**Рис. 15.** Дешифрирование АФС верхней части подводного берегового склона (юго-западный Сахалин) методом заложения ландшафтного профиля [2].

а – полоска аэрофотоизображения, отвечающая линии профиля: 1 – узкая полоска белого и светло-серого тона, соответствующая изображению надводной и подводной частей пляжа; 2 – мелкопятнистый зернистый рисунок связан с изображением комплексного растительного покрова, где темные детали обусловлены пятнами zostеры, а светлые – разреженным покровом известковых водорослей на щебнистом дне; 3 – светло-серый тон, отвечающий выравненному щебнистому дну с разреженным покровом известковых водорослей; простирание пластов коренных пород угадывается по легкой полосчатости рисунка; 4 – темный пятнистый, зернистый рисунок изображения, обусловленный зарослями морской травы (*Phyllospadix*), занимающими местами значительные участки; 5 – крупные пятна и полосы интенсивного темного тона обозначают заросли ламинарии на вершинах гряд; гряды и межгрядовые понижения с покровом известковых водорослей (светлый тон с легкой полосчатостью рисунка, обусловленной линиями напластований);

б – ландшафтный профиль через аэрофотоизображение, приведенное выше. Точки описания на АФС (1–5) соответствуют точкам, показанным в верхней части профиля. Грунты: 1 – песок; 2 – галька и гравий; 3 – валуны; 4 – коренные породы; подводная растительность: 5 – *Zostera marina*; 6 – *Phyllospadix iwatensis*; 7 – *Laminaria japonica*; 8 – *Sargassum mijabei*; 9 – *Ptilota filicina*; 10 – *Ulva fenestrata*; 11 – *Tichocarpus crinitus*; 12 – *Laingia pacifica*; 13 – *Corallina pilulifera*; 14 – *Pachyarthron cretaceum*; 15 – известковые водоросли

### Аэрофотографическое эталонирование и экстраполяция дешифровочных признаков

Перед аэрофотографическим эталонированием стоит задача представить наиболее характерные изображения ДПК, раскрывающие природу подводного ландшафта в целом. Дешифрирование ландшафта подводной береговой зоны обеспечивается разработкой системы элементарных аэрофотографических эталонов. Последние представляют собой вырезки из аэрофотоснимков, характеризующие изображения ДПК ключевых участков. Они систематизируются в виде условных знаков к аэрофотоизображению всего ландшафта и используются для экстраполяции дешифровочных признаков на однотипные изображения.

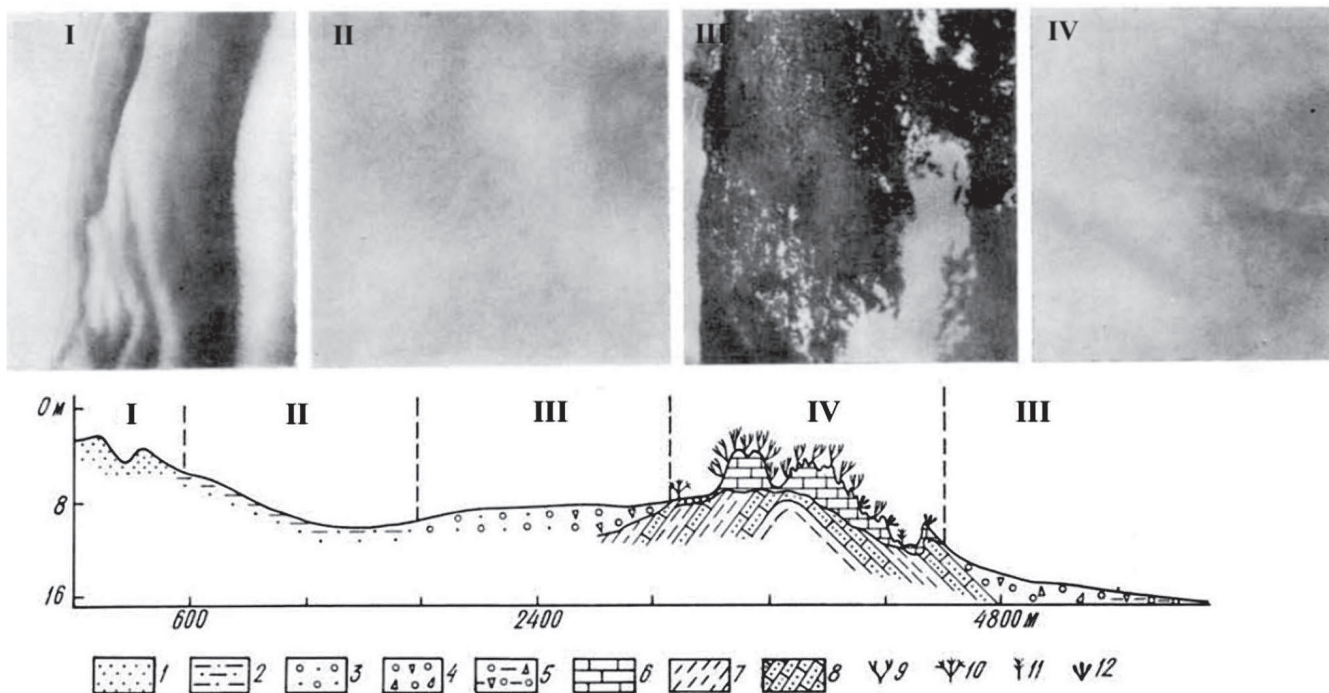
Внутриландшафтная экстраполяция осуществляется путем переноса дешифровочных признаков с ключевых участков на однотипные аэрофотоизображения. Межландшафтная экстраполяция проводится путем изучения ландшафтов-аналогов и переноса установленных дешифровочных признаков на тер-

ритории непосещенных ландшафтов, однотипных с изученными. Ареал межландшафтной экстраполяции связан с рубежами физико-географического районирования. Достоверность экстраполяции тем выше, чем ближе в классификационной системе и в сетке районирования лежат ландшафты-аналоги.

### Программа комплексных ландшафтно-биологических исследований дна морских мелководий

Приведем программу комплексных исследований, разработанную на основе опыта ландшафтно-биологического изучения морей России [3]. Работы, основанные на дешифрировании дистанционных изображений, морских и подводных исследований, предлагается направить на решение следующих задач.

1. Выявить особенности рельефа морских окраин, связанные с новейшим унаследованным дифференцированным развитием морфоструктур:



**Рис. 16.** Фрагмент ландшафта подводного склона Анапской Пересыпи, Черное море [2]. Верхний ряд – аэрофотографические эталоны. I – подводные береговые валы; II, IV – поле ракуши; III – банка, образованная плотносцементированными породами, густо обросшими водорослями (биоценоз цистозиры). Нижний ряд – ландшафтный профиль. Подводные угодья (вертикальные штриховые линии): а – береговые валы; б – песчаные равнины; в – поля ракуши; г – скалы и камни (каменистая банка); д – илесто-ракушечные равнины; грунты: 1 – песчаные; 2 – илесто-ракушечные; 3 – песчано-ракушечные; 4 – ракушечные (целая и битая ракуши, ракушечный песок); 5 – илесто-ракушечные; коренные породы: 6 – четвертичные литифицированные ракушечники; 7 – меотические глины; 8 – меотические мергели; растительность: 9 – *Cestoseira barbata*; 10 – *Nereia filiformis*; 11 – *Chondria teunissima*; 12 – *Phyllophora nervosa*

- морфоструктуры, испытывающие унаследованное поднятие, линии активных новейших дислокаций, берега продольного и поперечного типов;
  - высокие берега с активным клифом, на морском дне (абразионно-скульптурные банки и рифы), биотоп скал и камней, биоценозы обрастателей;
  - морфоструктуры, испытывающие унаследованное опускание и связанные с ними приморские низменности и подводный береговой склон аккумулятивного типа (биотоп песчано-илистых грунтов, биоценозы закапывающихся групп гидробионтов (инфауна)).
2. Оценить экологическую роль гидрологических условий:
- температурный режим, соленость, глубина слоя скачка;
  - морские течения, места апвеллинга и даунвеллинга;
  - местный режим приливов и отливов, интенсивность ветрового волнения.
3. Опираясь на морфоструктурные, гидрологические и гидробиологические особенности, провести границы подводных ландшафтов и картировать их внутреннюю морфологическую структуру:
- охарактеризовать подводные угодья и фации-доминанты;
  - отметить их положение в системе единиц вертикального подразделения морского дна.
4. Определить место ландшафта в системе единиц географической зональности, вертикальной поясности и морфоструктурного районирования.
- Выполнение ландшафтно-биомических исследований по предложенной программе обеспечит единообразие работ и сравнимость полученных результатов.

## Литература

### Список русскоязычной литературы

1. Гурьева ЗИ, Петров КМ, Рамм НС, Шарков ВВ. Геолого-геоморфологическое изучение морских мелководий и берегов по материалам аэрофотосъемки. Л.: Наука; 1968.
2. Гурьева ЗИ, Петров КМ, Шарков ВВ. Аэрофотометоды геолого-геоморфологического исследования внутреннего шельфа и берегов морей. Атлас аннотированных аэрофотоснимков. Л.: Недра; 1976.
3. Петров КМ. Морская экология: экосистемы и подводные ландшафты: учебное пособие для бакалавров. М.: Ай Пи Ар Медиа; 2023.
4. Петров КМ. Подводные ландшафты: теория, методы исследования. Л.: Наука; 1989.
5. Ткаченко КС. Использование аэрокосмической съемки в гидробиологических исследованиях. Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012;14(1):15-31.

### Общий список литературы/References

1. Guryeva ZI, Petrov KM, Ramm NS, Sharkov VV. Geologo-Morfologicheskoye Izucheniye Morskikh Melkovodiy i Beregov po Materialam Aerofotosyemki. [Geological and Geomorphological Studies of Marine Shallow Waters and Shores Based on Aerial Photography Materials]. Leningrad: Nauka; 1968. (In Russ.)
2. Guryeva ZI, Petrov KM, Sharkov VV. Aerofotometody Geologo-Geomorfologicheskogo Issledovaniya Vnutrennego Shelfa i Beregov. Morey. Atlas Annotirovannykh Aerofotosnimkov. Leningrad: Nedra; 1976. (In Russ.)
3. Petrov KM. Morskaya Ekologiya: Ekosistemy i Podvodnye Landshafty: Uchebnoye Posobiye dlia Bakalavrov. Moscow: IPR Media; 2023. (In Russ.)
4. Petrov KM. Podvodnye Landshafty: Teoriya i Metody Issledovaniya. [Underwater Landscapes: Theory and Research Methods]. Leningrad: Nauka; 1989. (In Russ.)
5. Tkachenko KS. [Use of aerial and satellite photography in hydrobiological research]. Izvestiya Samarskogo Nauchnogo Tsentra Rossiyskoy Akademii Nauk. 2012;14(1):15-31. (In Russ.)
6. Lepley LK, Adams WM. Reflectivity of Electromagnetic Waves at an Air-water Interface for Pure and Sea Water. WRRC technical report No.25. Honolulu (HI): Water Resources Research Center, University of Hawaii at Manoa; 1968.
7. Kutser T, Hedley J, Giardino C, Roelfsema C, Brando V. Remote sensing of shallow waters – A 50-year retrospective and future directions. Remote Sens Environ. 2020;240:111619.
8. O'Neill J, Costa M, Sharma T. Remote sensing of shallow coastal benthic substrates: In situ spectra and mapping of eelgrass (*Zostera marina*) in the Gulf Islands National Park Reserve of Canada. Remote Sensing. 2011;3(5):975-1005.
9. Ventura D, Grosso L, Pensa D, Casoli E, Mancini G, Valente T, Scardi M, Rakaj A. Coastal benthic habitat mapping and monitoring by integrating aerial and water surface low-cost drones. Front Marine Scie. 2023;(9):72-86.