

КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ И ТЕОРЕТИКО-МНОЖЕСТВЕННАЯ МОДЕЛИ ЗАДАЧИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМОТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ПРОБООТБОРА ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

А.Л. Ронжин, М.О. Дудаков, Д.С. Дудакова

Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук,
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация
E-mail: ronzhin@iias.spb.su

Аннотация. Системно рассмотрена задача модернизации лимнологического оборудования, применяемого для пробоотбора донных отложений. Предложены концептуальная и теоретико-множественная модели задачи функционирования и применения дночерпателя. Приведена классификация существующих пробоотборников, рассмотрены их отличительные характеристики, а также исторический обзор проведенных модернизаций. Задача проектирования допустимых системотехнических решений дночерпателя сводится к поиску вариантов, удовлетворяющих функциональным, эргономическим критериям. Окончательное решение о структуре и функциях дночерпателя и программно-аппаратном обеспечении принимается с учетом стоимостных затрат всего жизненного цикла оборудования. Подчеркивается важность учета аспектов эргономики и безопасности применения исследовательских измерительных инструментов и средств пробоотбора при их проектировании и модернизации. Разработанная версия дночерпателя отличается применением анализа качества забора пробы при автоматизации срабатывания ковшей. Дночерпатель был успешно апробирован в период экспедиции по Ладожскому озеру, а собранный материал по динамике изменения ускорения в момент приземления дночерпателя на донный грунт будет использоваться для конфигурирования структуры и обучения искусственной нейронной сети, на основе которой будет разработана бортовая система распознавания типов донных поверхностей.

Ключевые слова: системный анализ; жизненный цикл оборудования; лимнология; пробоотбор; дночерпатель; эргономика; донный грунт; искусственные нейронные сети.

1. Постановка задачи

Целью данного исследования являлось определение направлений модернизации лимнологического оборудования и их оценивание с точки зрения увеличения функциональных возможностей, удовлетворения эргономических требований и стоимостных затрат. Структура статьи сформирована следующим образом. В первую очередь описана концептуальная модель предметной области исследования, затем приведена классификация существующих образцов лимнологического оборудования, применяемых для отбора донных проб, после чего представлена теоретико-множественная модель, раскрывающая структурно-функциональные связи дночерпателей и описывающая критерии оценивания их характеристик. Также обсуждается выполненная модернизация дночерпателя коробчатого типа и результаты его экспериментальной проверки во время экспедиций по Ладожскому озеру.

Средства пробоотбора донных отложений (дночерпатели) являются одними из основных первичных исследовательских средств в области лимнологии. Для формализации задачи функционирования и применения дночерпателя рассмотрим концептуальную модель, представленную на рис. 1, которая включает следующие основные сущности: дночерпатель, проба донного грунта, окружающая среда, транспортное средство, специалист-лимнолог, задача пробоотбора, критерии оценивания дночерпателя. Предложенная концептуальная модель является основой для выявления основных недостатков существующего лимнологического оборудования, формирования требований к новым разрабатываемым образцам и оценивания качества как самих дночерпате-

Математика

лей, так и реализации всей поставленной задачи пробоотбора. Описание параметров предложенных основных сущностей рассмотрим ниже при описании теоретико-множественной модели задачи функционирования и применения дночерпателя.



Рис. 1. Концептуальная модель задачи функционирования и применения дночерпателя

Далее рассмотрим особенности задачи пробоотбора и кратко историю создания устройств донного пробоотбора с классификацией и примерами существующего оборудования. В любом водоёме – от маленького пруда до океана – постоянно идут два противоположных процесса: осадконакопление и диффузия веществ из донных осадков в воду. Донные осадки являются естественным буфером для химических веществ водоёма и одновременно домом для огромного числа живых организмов от простейших бактерий и водорослей до рыб и моллюсков. Поэтому донные осадки водоёмов изучаются специалистами как естественных наук (гидрология, экология, гидробиология, палеогеография, геология и др.), так и прикладных областей, в частности сельского хозяйства (сапропели, аквакультура). Изучение состава и структуры донных отложений позволяют получить информацию о текущем состоянии водоёма, его истории и даже дать прогноз на будущее.

Процесс отбора бентосных проб является начальным, но очень существенным этапом в цикле получения информации о донных осадках водоёма, так как результаты даже самого точного (и дорогостоящего) анализа теряют всякий смысл при неправильно проведенном отборе пробы. Ошибки, возникающие вследствие некорректного отбора пробы, в дальнейшем исправить, как

правило, уже невозможно. Поэтому достоверность и точность последующего анализа в значительной степени зависят от правильности выбора способа и тщательности проведения процедуры отбора.

Дночерпатели являются основным инструментом для проведения бентосного пробоотбора. Их совершенствование, а также разработка новых конструкций и схем является естественным путём для получения корректных данных о донных осадках и их обитателях.

На рис. 2 приведена оригинальная классификация широкого спектра приборов для решения задач донного пробоотбора: драги, скребки, пробоотборники-насосы и другие [1]. Отбор проб грунта с определенной, заданной габаритами пробоотборника, площади производится с помощью специализированных механических устройств – дночерпателей и трубчатых пробоотборников [1–4]. Первые и по сей день наиболее распространенные дночерпатели появились в прошлом веке в форме конструкций, разработанных Карлом Дж. Й. Петерсенем в 1911 г. [5], Свенном Экманом [6] в 1911 г., Эдвардом А. Берджи [7] в 1921 г. Несколько позже, в 1933 г., был разработан дночерпатель Ван-Винна, принцип работы которого был достаточно схож с дночерпателем Петерсена, однако имел более совершенный механизм срабатывания [8]. В дночерпателях Экмана и Берджи для срабатывания механизма схлопывания применялся посыльный груз, отправляемый оператором, проводящим пробоотбор. В двух же других конструкциях применялся принцип работы по типу грейфера, и таким образом была сделана попытка автоматизирования процесса схлопывания пробоотборника на дне.

Позднее происходило взрывообразное развитие идей по конструкциям и модификациям пробоотборников для решения различных задач [1, 9–12]. Океанические глубоководные исследования потребовали создания крупногабаритных дночерпателей, что определялось необходимостью пробоотбора с очень больших глубин, отбора проб большого объема для анализа специалистами разных научных дисциплин, масштабной оценки геологического строения дна и состава донных осадков, изучения крупных бентосных организмов. Такие приборы начали появляться с 1950-х годов [4]. Появилась необходимость разработки устройств для отбора стратифицированных колонок (керн) на глубины, большие по сравнению с теми, что давали дночерпатели. Ранние пробоотборники керн, на основе которых появились более поздние конструкции, включали корбчатый пробоотборник Рейнека [13] и трубчатый пробоотборник Крейба [14].

Для изучения гетерогенности донного грунта и его обитателей стали использоваться мульти- и мегакореры [4]. Появились пробоотборники, управляемые аквалангистами при погружении [15]. Позднее развитие робототехнических устройств и подводных аппаратов позволило создавать системы доставки и автоматизированного управления пробоотборниками непосредственно с ПА с контролем условий и качества пробоотбора (ROV corers) [1]. Также начала применяться видеосъемка, сопровождающая пробоотбор [16].

В настоящее время в практике лимнологических работ используются хорошо зарекомендовавшие себя для решения конкретных задач пробоотборники. Основные модели, известные на настоящий момент и доступные в продаже или производимые под заказ в России, приведены в таблице.

2. Теоретико-множественная модель задачи функционирования и применения дночерпателя

На основе предложенной концептуальной модели, приведенной на рис. 1, рассмотрим далее теоретико-множественную модель задачи функционирования и применения дночерпателя, описываемую следующим кортежем параметров:

$$BGF = \langle G, B, E, V, M, W, Q \rangle,$$

где G – кортеж параметров дночерпателя, B – кортеж параметров пробы донного грунта, E – кортеж параметров окружающей среды, V – кортеж параметров транспортного средства, M – кортеж параметров специалиста-лимнолога, W – кортеж параметров описания задачи пробоотбора, Q – кортеж критериев оценивания качества дночерпателя. Далее рассмотрим введенные параметры более подробно.

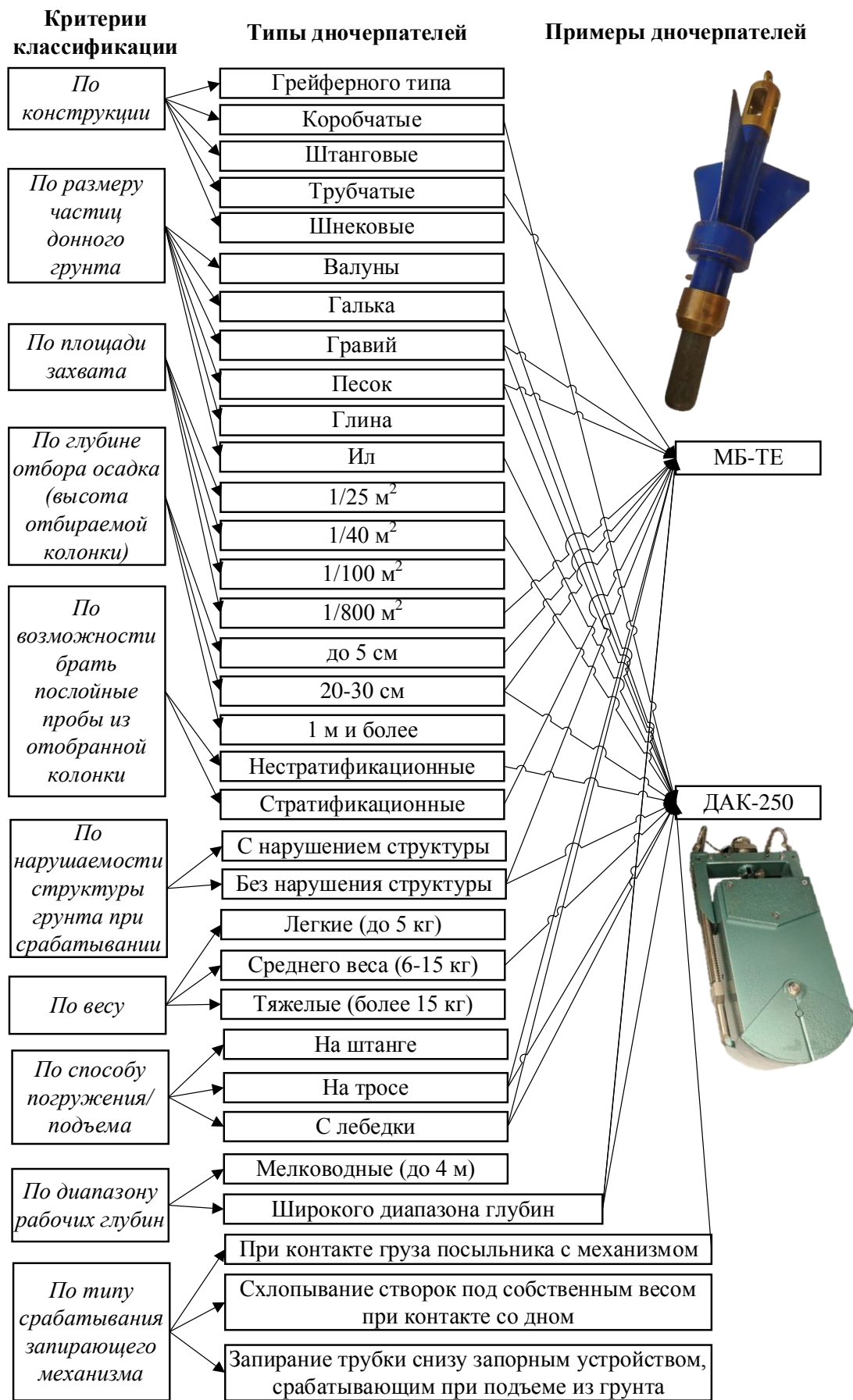


Рис. 2. Классификация дночерпателей для пробоотбора

Обзор существующих конструкций устройств для донного пробоотбора

Модель	Особенности рабочих грунтов	Принцип действия
Дночерпатель штанговый ГР-91	Песчано-гравелистые донные отложения	При натяжении троса заборный ковш поворачивается под действием пружины
Дночерпатели коробчатые автоматические: ДАК-100, ДАК-250, ДАК-400	Для мягких и средней плотности грунтов	Удар посылы освобождает пружины, захлопывающие челюсти
Дночерпатель Ван-Винна	Сбор поверхностного слоя грунта	Скребки, втягиваемые тросом, соскребают верхний слой грунта
Дночерпатель Петерсена	Сбор поверхностного слоя грунта	Скребки, втягиваемые тросом, соскребают верхний слой грунта
Дночерпатель Заболоцкого	Сбор донных проб на глубинах < 2,5 м	Челюсти захлопываются под весом вертикальной штанги при снятии ее с упоров (повороте)
Трубчатый дночерпатель Мордухай-Болтовского	Сбор донных проб на глубинах < 2,5 м	Грунт набивается в трубу при заглублении и поднимается с поворотом вокруг оси
Дночерпатели стратификационные: ДЧС-100, ДЧС-250	Для мягких и средней плотности грунтов с послойной стратификацией через каждые 50 мм	Удар посылы освобождает пружины, захлопывающие челюсти
Дночерпатель Экмана-Берджи: 100x100, 200x200	Для мягких и средней плотности грунтов	Удар посылы освобождает пружины, захлопывающие челюсти
Дночерпатели трубчатые: ТГ-1, ТГ-1,5	Для мягких грунтов	Донный осадок забивается в трубку при ее ударе о дно, и трубка закрывается инерционным клапаном
Трубка Лаури-Ниеместо	Для мягких и средней плотности грунтов (с ограничениями)	Донный осадок забивается в трубку при ее ударе о дно, и трубка закрывается запорным механизмом при вытягивании ее из грунта
Дночерпатель микробендометр МБ-ТЕ	Для мягких и средней плотности грунтов	Донный осадок забивается в трубку при ее ударе о дно, и трубка закрывается барометрическим клапаном, иногда дополняется дополнительным запорным механизмом, срабатывающим при вынимании из грунта

$G = \langle F_G, A_G, H_G, L_G, D_G, R_G, W_G, S_G, P_G, E_G, C_G \rangle$ – кортеж параметров, описывающий основные характеристики дночерпателя: F_G – множество видов конструкции, A_G – максимальное значение площади захвата дночерпателя, H_G – максимальное значение высоты отбираемой колонки, L_G – наличие возможности стратификационного отбора, I_G – бинарная оценка нарушаемости структуры грунта при отборе, D_G – множество диапазонов рабочих глубин, R_G – множество способов погружения/подъема, W_G – множество диапазонов весов, S_G – множество бортового сенсорного оборудования, P_G – кортеж характеристик бортового вычислительного оборудования, E_G – кортеж характеристик бортовой системы электропитания, C_G – кортеж характеристик бортового оборудования связи.

Множество видов конструкций включает $F_G = \{F_G^1, F_G^2, F_G^3, F_G^4, F_G^5\}$, где обозначены следующие конструкции: F_G^1 – грейферного типа, F_G^2 – коробчатые, F_G^3 – штанговые, F_G^4 – трубчатые, F_G^5 – шнековые. В множестве диапазонов рабочих глубин выделяют два типа $D_G = \{D_G^1, D_G^2\}$, где D_G^1 – мелководные (до 4 м), D_G^2 – широкого диапазона глубин. Множество способов погружения/подъема включает $R_G = \{R_G^1, R_G^2, R_G^3\}$, где R_G^1 – на штанге, R_G^2 – на тросе, R_G^3 – с лебедки. Множество диапазонов весов содержит $W_G = \{W_G^1, W_G^2, W_G^3\}$, где W_G^1 – легкие (до 5 кг), W_G^2 – среднего веса (5–15 кг), W_G^3 – тяжелые (более 15 кг). Множество бортового сенсорного оборудования $S_G = \{S_G^1, S_G^2, \dots, S_G^s, \dots, S_G^{SS}\}$, $s = [1, SS]$, включающего датчики измерения разных величин: температуры, мутности, кислотности и т. д. При этом для повышения надежности и достоверности измерений датчики одного типа могут ставиться на борт в нескольких экземплярах в зависимости от предъявляемых эксплуатационных требований.

Предполагается, что бортовое вычислительное оборудование дночерпателя не обладает высокой мощностью и развитой периферией, поэтому описание кортежа его характеристик включает основные элементы, которые важны при интеграции составных частей дночерпателя: $P_G = \langle P_G^{Freq}, P_G^{Ener}, P_G^{Volt}, P_G^{Dim}, P_G^{Weg} \rangle$, где P_G^{Freq} – тактовая частота процессора, P_G^{Ener} – потребляемая электрическая мощность процессора, P_G^{Volt} – электрические характеристики процессора, P_G^{Dim} – габаритные размеры бортового вычислительного оборудования, P_G^{Weg} – вес бортового вычислительного оборудования. Последние два параметра критичны с точки зрения размещения и балансировки дночерпателя, так как в свободном падении или спуске на тросе важно сохранить вертикальность входа конструкции в донный грунт.

Кортеж характеристик бортовой системы электропитания содержит $E_G = \langle E_G^{Typ}, E_G^{Cap}, E_G^{Volt}, E_G^{Char}, E_G^{Weg}, E_G^{Dim} \rangle$, где E_G^{Typ} – тип аккумулятора, E_G^{Cap} – емкость аккумулятора, E_G^{Volt} – электрические характеристики, E_G^{Typ} – способ зарядки (беспроводной, тип разъема проводной зарядки), E_G^{Weg} – вес аккумулятора, E_G^{Dim} – габаритные размеры бортовой системы электропитания.

Кортеж характеристик бортовой системы связи содержит $C_G = \langle C_G^{Typ}, C_G^{Dist}, C_G^{Volt}, C_G^{Ener}, C_G^{Weg}, C_G^{Dim} \rangle$, где C_G^{Typ} – тип связи (проводная, беспроводная (гидроакустическая, оптическая)), C_G^{Dist} – максимальная гарантированная дальность передачи данных, C_G^{Volt} – электрические характеристики, C_G^{Ener} – потребляемая электрическая мощность системы связи, C_G^{Weg} – вес системы связи, C_G^{Dim} – габаритные размеры бортовой системы связи.

Параметры пробы донного грунта представлены следующим кортежем: $B = \langle K_B, Part_B, W_B, H_B, D_B, T_B, ADINF_B \rangle$, где K_B – тип грунта, $Part_B$ – размер частиц донного грунта, W_B – вес пробы, H_B – высота взятой колонки пробы, D_B – глубина дна, где была взята проба, T_B – время и дата взятия пробы, $ADINF_B$ – дополнительная информация о пробе, получаемая от бортовой сенсорной системы или из внешних открытых реестров. Тип грунта K_B выбирается из множества $Type_{BotSoil}$ в зависимости от точности автоматического анализа, навыков эксперта или требуемой точности. По размеру частиц донного грунта $Part_B$ выделяют несколько типов грунта: ил, глина, песок, гравий, валуны.

Кортеж параметров окружающей среды включает $E = \langle Lk_E, Wth_E, Clm_E \rangle$, где Lk_E – характеристики водоема, Wth_E – характеристики погодных условий, Clm_E – характеристики климатических условий. Описание характеристик водоема представляет собой кортеж следующих параметров:

$$Lk_E = \left\langle Lk_E^{Th}, Lk_E^{Tp}, Lk_E^{TISq}, Lk_E^{WtSq}, Lk_E^{WtCmSq}, Lk_E^{WtVI}, Lk_E^{DpMn}, Lk_E^{DpMx}, Lk_E^{LnMx}, Lk_E^{WdMx}, Lk_E^{WdMn}, Lk_E^{CsLn}, Lk_E^{CsInd}, Lk_E^{LzZnSq}, Lk_E^{WtTrph} \right\rangle, \text{ где}$$

Lk_E^{Th} – название озера, Lk_E^{Tp} – тип водоема, Lk_E^{TISq} – площадь общая, Lk_E^{TISq} – площадь водного зеркала, Lk_E^{TISq} – площадь водосбора, Lk_E^{TISq} – объем водоема, Lk_E^{TISq} – средняя глубина, Lk_E^{TISq} – максимальная глубина, Lk_E^{TISq} – максимальная длина, Lk_E^{TISq} – максимальная ширина, Lk_E^{TISq} – средняя ширина, Lk_E^{TISq} – длина береговой линии, Lk_E^{TISq} – изрезанность береговой линии, Lk_E^{TISq} – площадь литоральной зоны, Lk_E^{TISq} – трофность водоема. В случае необходимости эти базовые параметры могут дополняться.

Описание характеристик текущих погодных условий на территории, где располагается водоем, представляет собой кортеж следующих параметров:

$$Wth_E = \langle Wth_E^{ArTmp}, Wth_E^{WtTmp}, Wth_E^{WndSpd}, Wth_E^{WndDrc}, Wth_E^{Exc}, Wth_E^{RnVI}, Wth_E^{LkLv}, Wth_E^{Cld}, Wth_E^{VhcDrf} \rangle, \text{ где}$$

Wth_E^{ArTmp} – температура воздуха, Wth_E^{WtTmp} – температура воды, Wth_E^{WndSpd} – скорость ветра, Wth_E^{WndDrc} – направление ветра, Wth_E^{Exc} – волнение, Wth_E^{RnVI} – количество осадков, Wth_E^{LkLv} – уровень озера, Wth_E^{Cld} – облачность, Wth_E^{VhcDrf} – дрейф судна (в момент пробоотбора).

Описание характеристик климатических условий в регионе, где располагается водоем, представляет собой кортеж следующих параметров:

$$Clm_E = \langle Clm_E^{Tp}, Clm_E^{SsSIRd}, Clm_E^{SsTmp}, Clm_E^{SsWnd}, Clm_E^{SsRn}, Clm_E^{SsEvp}, Clm_E^{SsPrs} \rangle, \text{ где } Clm_E^{Tp} \text{ – тип климата,}$$

Clm_E^{SsSIRd} – солнечная радиация по сезонам, Clm_E^{SsTmp} – температура по сезонам, Clm_E^{SsWnd} – ветер по сезонам (роза ветров), Clm_E^{SsRn} – осадки по сезонам, Clm_E^{SsEvp} – испарение по сезонам, Clm_E^{SsPrs} – давление по сезонам.

Кортеж параметров транспортного средства, которое применяется для перевозки и эксплуатации дночерпателя, включает $V = \langle Tp_V, Ft_V, DvEq_V \rangle$, где Tp_V – тип транспортного средства (воздушный, наземный, надводный, подводный), Ft_V – характеристики применяемого транспортного средства, $DvEq_V$ – характеристики оборудования погружения/подъема на транспортном средстве.

Сведения о специалисте-лимнологе, участвующем в экспедиции, включают также персональные данные, но в рамках данного исследования используется ограниченный кортеж параметров, включающий: $M = \langle Sk_M, Sch_M \rangle$, где Sk_M – навыки специалиста, Sch_M – график работы специалиста.

Описание параметров задачи пробоотбора содержит кортеж $W = \langle Tp_W, Ms_W, Tm_W, Eq_W, Cst_W \rangle$, где Tp_W – тип задачи, Ms_W – необходимое число специалистов, Tm_W – необходимое время реализации, Eq_W – необходимое оборудование, Cst_W – стоимость реализации задачи.

Критерии оценивания качества дночерпателя представлены кортежем $Q = \langle Fnc_Q, Erg_Q, Cst_Q \rangle$, где Fnc_Q – множество функциональных критериев, Fnc_Q – множество эргономических критериев, Fnc_Q – множество стоимостных критериев. Вопросы эргономики и безопасности применения исследовательских измерительных инструментов и средств пробоотбора непременно рассматриваются при их проектировании и модернизации. Зачастую пользова-

тель готов отказаться от части функций, если их использование вызывает физическое затруднение или алгоритмы управления слишком сложны для восприятия и запоминания. В работах ведущей научной школы профессора А.В. Богомолова детально обсуждаются проблемы безопасности персонала в профессиональной деятельности, создано математическое и методическое обеспечение средств индивидуальной и коллективной защиты, диагностики состояния человека [17–21].

Задача проектирования допустимых системотехнических решений дночерпателя сводится к поиску конструктивных путей формирования вариантов, удовлетворяющих функциональным, эргономическим критериям. Окончательное решение о структуре и функциях дночерпателя и программно-аппаратном обеспечении, необходимом для его реализации, принимается с учетом стоимостных затрат всего жизненного цикла оборудования [22].

3. Технологические особенности и предложенный вариант модернизации дночерпателя коробчатого типа

В данном исследовании основное внимание было уделено модернизации дночерпателя Экмана–Берджи/ДАК, поэтому далее рассмотрим более подробно технологические особенности его конструкции и ключевые моменты работы с прибором. История использования дночерпателя насчитывает уже более ста лет, за это время его механическая конструкция многократно модернизировалась, и на сегодняшний день, видимо, достигнуты максимально возможные показатели эффективности и надёжности для прибора, построенного по такой схеме. Было создано несколько как мелких вариаций конструкции, отличающихся размерами (и, соответственно, массой и объёмом), так и материалом: сталь, нержавеющая сталь, латунь, а также более принципиальными: использованием отдельной пружины (пружин) для привода каждой из двух створок пробоотборника. Такой вариант конструкции оказался более эффективным, он позволяет значительно увеличить запасаемую энергию в пружинах и соответственно повысить давление на створках при срабатывании, а также упрощает взведение прибора, поскольку каждую пружину (группу пружин) можно взводить отдельно [1, 11].

Но история совершенствования конструкции дночерпателей Экмана–Берджи/ДАК никак не затронула очень важный аспект: систему управления прибором. Выпускаемые на сегодняшний день дночерпатели по-прежнему, как и сто лет назад, управляются с помощью механического посыла, скользящего по тросу. Такая схема имеет практически одно преимущество: крайнюю простоту и дешевизну. При этом присутствуют несколько очень серьёзных недостатков. Приведём самые существенные из них:

1. Для движения посыла трос должен быть постоянно натянут, но излишний натяг может вытягивать несработавший дночерпатель из грунта.

2. Отклонение от вертикали троса более чем на 25° приведёт к несрабатыванию прибора из-за недостаточной кинетической энергии посыла, даже если сам дночерпатель идеально вертикально вошёл в грунт.

3. Огромное время движения посыла по тросу (до 2–3 мин зависит от глубины) за это время корабль даже на якорю значительно сместится.

Хотелось бы подчеркнуть, что эти проблемные моменты частично удаётся решить за счёт многолетнего опыта сотрудников, но эти методы не являются надёжными и требуют высочайшей квалификации.

Кроме этого, дночерпатель не имеет никаких средств контроля вертикальности входа в грунт и, соответственно, захваченной площади в пробе.

Исследования по оценке качества работы разных модификаций коробчатого пробоотборника Экмана с помощью прямого наблюдения аквалангистами были проведены С. Бломкистом [11]. Цитата из этой работы: «Наклон, заполнение до краев и потеря осадка из пробоотборника, а также перераспределение, ресуспендирование являются основными факторами некорректного отбора бентосных проб. Поскольку исследуемые группы являются моделями общего пользования, эти результаты свидетельствуют о том, что необходимо проявлять осторожность при оценке исследований, основанных на пробоотборе дночерпателем Экмана обычного дизайна. Надёжность отбора проб может быть значительно повышена за счет оснащения захватов опорной стойкой и механизмом, который фиксирует крышки во время подъема. Правильно управляемый захват Экма-

на соответствующей конструкции является подходящим инструментом для сбора определенных типов образцов, таких как бентосная макрофауна и инфауна в частности».

Приведённые исследования, а также многолетний опыт сотрудников СПб ФИЦ РАН, занимающихся бентосным пробоотбором, позволяет сформулировать вывод о необходимости модернизации дночерпателя Экмана–Берджа / ДАК-250 прежде всего в части управления срабатыванием и записи условий, при которых отбиралась проба (отклонение от вертикали, точная глубина, температура), при этом конструктив самого дночерпателя правильно сохранить, это прекрасно отлаженная, надёжная конструкция, которая описана в огромном количестве методик и исследований. Предложенная модернизация дночерпателей Экмана–Берджа / ДАК-250 призвана эффективно решить эти проблемы, оставив основную конструкцию практически без изменений.

Дополнительное сенсорное и вычислительное оборудование в автоматическом режиме принимает решение о захвате пробы и практически гарантирует корректность обора пробы с расчётной площади грунта. В подавляющем большинстве случаев работа производится в режиме «быстрый спуск–подъём», что значительно ускоряет процесс и существенно снижает требования к квалификации оператора. Новая версия дночерпателя состоит из следующих основных модулей: дночерпатель автоматический коробчатый ДАК-250, система управления с датчиками и сервоприводом срабатывания ковшей, трос.

Разработанная версия дночерпателя отличается применением анализа качества забора пробы при автоматизации срабатывания ковшей. Себестоимость дночерпателя существенно не увеличивается за счет минимизации дорогостоящего оборудования для подводного визуального мониторинга и распределения функций между специалистом и автоматикой. В период экспедиции по Ладожскому озеру в августе-сентябре 2022 года с помощью разработанного интеллектуального дночерпателя был проведен сбор свыше 160 проб.

Собранный в ходе экспериментов материал по динамике изменения ускорения в момент приземления дночерпателя на донный грунт также представляет собой интерес с точки зрения автоматизации классификации типов донных поверхностей на твердые скальные и каменистые, гравийно-галечные, песчаные, алевролиты, алевопелиты, глины и другие. Полученный набор сигналов длительностью 0,5 с с частотой дискретизации 200 Гц содержит целые числа в диапазоне [0, 4000] и будет использоваться для конфигурирования структуры и обучения искусственной нейронной сети, на основе которой будет разработана бортовая система распознавания типов донных поверхностей.

Авторы выражают признательность профессору А.В. Богомолу за плодотворные дискуссии и считают своим приятным долгом поздравить профессора А.В. Богомолова с юбилеем.

Литература

1. Eleftheriou, A. Methods for the Study of Marine Benthos / A. Eleftheriou. – Heraklion, Greece, 2013. – 496 p.
2. Жадин, В.И. Методика изучения донной фауны водоёмов и экологии донных беспозвоночных. Жизнь пресных вод. Том. 4. Часть 1 / В.И. Жадин. – М.-Л.: Академия наук СССР, 1956. – С. 279–382.
3. Characteristics of Portable Core Samplers for Lake Deposit Investigations / K. Katsuki, K. Seto, Y. Suganuma, D.Y. Yang // Journal of Geography (Chigaku Zasshi). – 2019. – Vol. 128, Iss. 3. – P. 359–376.
4. Corers and Grabs / B.E. Narayanaswamy, B.J. Bett, P.A. Lamont *et al.* // Biological Sampling in the Deep Sea (eds M.R. Clark, M. Consalvey and A.A. Rowden). – 2016.
5. Petersen, C.G.J. Valuation of the Sea. I. Animal Life of the Sea Bottom, Its FOOD and quantity. Report from the Danish Biological Station / C.G.J. Petersen, P. Boysen-Jensen. – 1911. – Vol. 20. – pp. 1–81.
6. Ekman, S. Neue Apparate zur Qualitativen und Quantitativen Erforschung der Boden-Fauna der Seen / S. Ekman // Int. Revue ges. Hydrobiol. Hydrogr. – 1911. – Vol. 3, Iss. 5-6. – P. 553–561.
7. Birge, E.A. A Second Report on Limnological Apparatus / E.A. Birge // Trans. Wis. Acad. Sci. Arts Lett. – 1921. – Vol. 20. – P. 533–552.
8. van Veen J. Onderzoeken naar het zandtransport van rivieren / J. van Veen // De Ingenieur. – 1933. – Vol. 48. – P. 151–160.

9. Лисицын, А.П. Дночерпатель «Океан-50» и возможности его применения при океанографических исследованиях / А.П. Лисицын, Г.Б. Удинцев // Метеорология и гидрология. – 1952. – № 8. – С. 44–46.
10. Elliott, J.M. A Comparative Study of Seven Grabs used for Sampling Benthic Macroinvertebrates in Rivers / J.M. Elliott, C.M. Drake // Freshwater biology. – 1981. – Vol. 11, Iss. 2. – P. 99–120.
11. Blomqvist, S. Sampling Performance of Ekman Grabs – *in situ* Observations and Design Improvements / S. Blomqvist // Hydrobiologia. – 1990. – Vol. 206. – P. 245–254.
12. Jonasson, A. New Devices for Sediment Sampling / A. Jonasson, E. Olausson // Marine Geology. – 1966. – Vol. 4, Iss. 5. – P. 365–372.
13. Reineck, H.E. Der Kastengreifer / H.E. Reineck // Natur und Museum. – 1963. – Vol. 93, no. 3. – P. 101–108.
14. Craib, J.S. A Sampler for Taking Short Undisturbed Marine Cores / J.S. Craib // ICES Journal of Marine Science. – 1965. – Vol. 30, Iss. 1. – P. 34–39.
15. Rowe, G.T. Modifications of the Birge–Ekman Box Corer for use with SCUBA or Deep Submergence / G.T. Rowe, C.H. Clifford // Limnology and Oceanography. – 1973. – Vol. 18. – P. 172–175.
16. Mortensen, P.B. Video-Assisted Grabbing: a Minimally Destructive Method of Sampling Azooxanthellate Coral Banks / P.B. Mortensen, J.M. Roberts, R.C. Sundt // Journal of the Marine Biological Association United Kingdom. – 2000. – Vol. 80, Iss. 2. – P. 365–366.
17. Kukushkin, Yu.A. Procedure for Synthesizing the Index of an Operator's Psychophysiological Stress / Yu.A. Kukushkin, A.V. Bogomolov // Biomedical Engineering. – 2001. – no. 4. – P. 29–33.
18. Богомолов, А.В. Концепция математического обеспечения диагностики состояния человека / А.В. Богомолов // Информатика и системы управления. – 2008. – № 2 (16). – С. 11–13.
19. Исследование эффективности средств индивидуальной и коллективной защиты от шума на основе оценки потенциальной ненадежности профессиональной деятельности авиационных специалистов / В.Н. Зинкин, Ю.А. Кукушкин, А.В. Богомолов и др. // Безопасность жизнедеятельности. – 2010. – № 11 (119). – С. 2–6.
20. Проблемы обеспечения акустической безопасности персонала авиационной промышленности / С.К. Солдатов, А.В. Богомолов, В.Н. Зинкин, С.П. Драган // Безопасность труда в промышленности. – 2014. – № 10. – С. 58–60.
21. Экологические аспекты безопасности жизнедеятельности населения, подвергающегося действию авиационного шума / В.Н. Зинкин, А.В. Богомолов, И.М. Ахметзянов, П.М. Шешегов // Теоретическая и прикладная экология. – 2011. – № 3. – С. 97–101.
22. Методы и алгоритмы синтеза технологий и программ управления реконfigurацией бортовых систем маломассоразмерных космических аппаратов / В.Н. Калинин, А.Ю. Кулаков, А.Н. Павлов и др. // Информатика и автоматизация. – 2021. – no. 2 (20). – С. 236–269.

Поступила в редакцию 15 декабря 2022 г.

Сведения об авторах

Ронжин Андрей Леонидович – доктор технических наук, профессор, директор, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-8903-3508>, e-mail: ronzhin@iias.spb.su

Дудаков Михаил Олегович – ведущий инженер лаборатории комплексных проблем лимнологии Института озераведения Российской академии наук, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-2254-4896>, e-mail: mike814@yandex.ru

Дудакова Дина Сергеевна – кандидат биологических наук, научный сотрудник, лаборатория гидробиологии Института озераведения Российской академии наук, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-7709-3933>, e-mail: judina-d@yandex.ru

CONCEPTUAL AND SET-THEORETICAL MODELS OF THE FUNCTIONING AND APPLICATION OF SYSTEM SOLUTIONS FOR BOTTOM SEDIMENT SAMPLING

A.L. Ronzhin, M.O. Dudakov, D.S. Dudakova

St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russian Federation

E-mail: ronzhin@ias.spb.su

Abstract. The modernization of limnological equipment used for the sampling of bottom sediments is systematically considered. Conceptual and set-theoretical models of the functioning and application of bottom grab sampling are proposed. A classification of existing samplers is given, their distinctive characteristics are considered, and a historical overview of upgrades is carried out. The task of designing acceptable system engineering solutions for bottom grab sampling is reduced to finding options that meet functional and ergonomic criteria. The structure and functions of bottom grab sampling software and hardware are considered taking into account the cost of the entire life cycle of the equipment. The importance of taking into account the ergonomics and safety of the use of the measuring instruments and sampling equipment during their design and modernization is emphasized. The version of the bottom grab sampler is distinguished by the use of sampling quality analysis when automating the operation of buckets. Bottom grab sampling was successfully tested during an expedition on Lake Ladoga. The collected material and the changes in acceleration at the time of the landing of the bottom grab sampler on the bottom sediment is used to configure the structure and train the artificial neural network, on the basis of which the on-board system for recognizing types of bottom surfaces.

Keywords: system analysis; equipment life cycle; limnology; sampling; bottom grab; ergonomics; bottom soil; artificial neural networks.

References

1. Eleftheriou A. *Methods for the study of marine benthos*. Heraklion, Greece, 2013, 496 p.
2. Zhadin V.I. *Metodika izucheniya donnoy fauny vodoyemov i ekologii donnykh bespozvonochnykh. Zhizn' presnykh vod. Tom. 4. Chast' 1* (Methods of studying the bottom fauna of reservoirs and ecology of bottom invertebrates. The life of fresh waters. Vol. 4. Part 1), Moscow, Leningrad, Akademiya nauk SSSR Publ., 1956, pp. 279–382. (in Russ.).
3. Katsuki K., Seto K., Suganuma Y., Yang D.Y. Characteristics of Portable Core Samplers for Lake Deposit Investigations. *Journal of Geography* (Chigaku Zasshi), 2019, Vol. 128, Iss. 3, pp. 359–376. DOI: 10.5026/jgeography.128.359
4. Narayanaswamy B.E., Bett B.J., Lamont P.A. *et al.* Corers and Grabs: Clark. In book: *Biological Sampling in the Deep Sea*, 2016. DOI: 10.1002/9781118332535.ch10
5. Petersen C.G.J., Boysen-Jensen P. Valuation of the Sea. I. Animal Life of the Sea Bottom, its Food and Quantity. *Report from the Danish Biological Station*, 1911, Vol. 20, pp. 1–81.
6. Ekman, S. Neue Apparate zur Qualitativen und Quantitativen Erforschung der Bodenfauna der Seen. *Internationale Revue Der Gesamten Hydrobiologie Und Hydrographie*, 1911, Vol. 3, Iss. 5-6, pp. 553–561. doi:10.1002/iroh.19110030509
7. Birge E.A. A Second Report on Limnological Apparatus. *Trans. Wis. Acad. Sci. Arts Lett.*, 1921, Vol. 20, pp. 533–552.
8. van Veen J. Onderzoeken Naar het Zandtransport van Rivieren. *De Ingenieur*, 1933, Vol. 48, pp. 151–160.

9. Lisitsyn A.P., Udintsev G.B. Dnocherpatel' "Okean-50" i vozmozhnosti ego primeneniya pri okeanograficheskikh issledovaniyakh (The "Ocean-50" Dredger and the Possibilities of Its Application in Oceanographic Research). *Meteorologiya i gidrologiya*, 1952, no. 8, pp. 44–46. (in Russ.).

10. Elliott J.M., Drake C.M. A Comparative Study of Seven Grabs used for Sampling Benthic Macroinvertebrates in Rivers. *Freshwater biology*, 1981, Vol. 11, Iss. 2, pp. 99–120. DOI: 10.1111/j.1365-2427.1981.tb01247.x

11. Blomqvist S. Sampling Performance of Ekman Grabs – In Situ Observations and Design Improvements. *Hydrobiologia*, 1990, Vol. 206, pp. 245–254. DOI: 10.1007/BF00014090

12. Jonasson A., Olausson E. New Devices for Sediment Sampling. *Marine Geology*, 1966, Vol. 4, Iss. 5, pp. 365–372. DOI: 10.1016/0025-3227(66)90040-5

13. Reineck H.E. Der Kastengreifer. *Natur und Museum*, 1963, Vol. 93, no. 3, pp. 101–108.

14. Craib J.S. A Sampler for Taking Short Undisturbed Marine Cores. *ICES Journal of Marine Science*, 1965, Vol. 30, Iss. 1, pp. 34–39. DOI: 10.1093/icesjms/30.1.34

15. Rowe G.T., Clifford C.H. Modifications of the Birge–Ekman Box Corer for use with SCUBA or Deep Submergence. *Limnology and Oceanography*, 1973, Vol. 18, pp. 172–175.

16. Mortensen P.B., Roberts J.M., Sundt R.C. Video-Assisted Grabbing: a Minimally Destructive Method of Sampling Azooxanthellate Coral Banks. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 2000, Vol. 80, Iss. 2, pp. 365–366. DOI: 10.1017/S0025315400001983

17. Kukushkin Yu.A., Bogomolov A.V. Procedure for Synthesizing the Index of an Operator's Psychophysiological Stress. *Biomedical Engineering*, 2001, no. 4, pp. 29–33.

18. Bogomolov A.V. Kontsepsiya matematicheskogo obespecheniya diagnostiki sostoyaniya cheloveka (The Concept of Mathematical Support for the Diagnosis of Human Condition). *Informatika i sistemy upravleniya*, 2008, no. 2 (16), pp. 11–13. (in Russ.).

19. Zinkin V.N., Kukushkin Yu. A., Bogomolov A.V., Soldatov S.K., Alekseenko M.S. Probe of Efficiency of Means of Individual and Collective Protection Against Noise on the Basis of an Estimation of Potential Unreliability of Professional Work of Aviation Experts. *Bezopasnost' zhiznedejatel'nosti*, 2010, no. 11 (119), pp. 2–6. (in Russ.).

20. Soldatov S.K., Bogomolov A.V., Zinkin V.N., Dragan S.P. Problemy obespecheniya akusticheskoy bezopasnosti personala aviatsionnoy promyshlennosti (Problems of ensuring acoustic safety of aviation industry personnel). *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*, 2014, no. 10, pp. 58–60. (in Russ.).

21. Zinkin V.N., Bogomolov A.V., Akhmetzyanov I.M., Sheshegov P.M. Environmental Aspects of Life Safety of People Affected by Aircraft Noise. *Teoreticheskaya i prikladnaya jekologiya*, 2011, no. 3, pp. 97–101. (in Russ.).

22. Kalinin V., Kulakov A., Pavlov A., Potryasaev S., Sokolov B. Methods and Algorithms for the Synthesis of Technologies and Programs for Controlling the Reconfiguration of On-board Systems of Small-Sized Spacecrafts. *Informatics and Automation*, 2021, no. 2 (20), pp. 236–269. (in Russ.).

Received December 15, 2022

Information about the authors

Ronzhin Andrey Leonidovich is Professor, Dr. Sc. (Engineering), Director, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russian Federation, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-8903-3508>, e-mail: ronzhin@iias.spb.su

Dudakov Mikhail Olegovich is Leading Engineer, Laboratory of Complex Problems of Limnology of the Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russian Federation, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-2254-4896>, e-mail: mike814@yandex.ru

Dudakova Dina Sergeevna is Cand. Sc. (Biological), Researcher of Laboratory of Hydrobiology of the Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russian Federation, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-7709-3933>, e-mail: judina-d@yandex.ru