

**Департамент образования и науки города Севастополя
Государственное бюджетное образовательное учреждение
Центр дополнительного образования
«Малая академия наук»**

«Разработка автономного измерительного буя для непрерывного мониторинга субмариной разгрузки подземных вод у м. Айя»

Работу выполнил:

учащийся творческого объединения
«Олимпиадная химия»
ГБОУ «ЦДО «Малая академия наук»
Минов Андрей Евгеньевич

Научный руководитель:

Довгий Илларион Игоревич,
преподаватель д. о., руководитель
творческого объединения «Олимпиадная
химия»
ГБОУ «ЦДО «Малая академия наук»,
к.х.н.,с.н.с. отдела «Биогеохимии моря»
ФГБУН ФИЦ МГИ РАН

СОДЕРЖАНИЕ

ОСНОВНЫЕ ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ	3
ВВЕДЕНИЕ.....	4
РАЗДЕЛ 1.ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ.....	7
1.1 Обзор исследований источников субмариной разгрузки у м.Айя.....	7
1.2 Обзор оборудования, применяемого при исследовании источников субмариной разгрузки. Обоснование актуальности разработки автономного буя	8
1.3. Этапы разработки и внедрения автономного устройства для измерений характерных показателей источников СПРВ	10
РАЗДЕЛ 2. КОНСТРУКТИВНАЯ ЧАСТЬ.....	12
2.1 Описание конструкции автономного буя.....	12
2.2 Проведение лабораторных испытаний экспериментального образца.....	16
2.3 Анализ данных, полученных в ходе лабораторных испытаний.....	16
ВЫВОДЫ.....	19
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	20

ОСНОВНЫЕ ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Субмаринная разгрузка подземных вод (СРПВ) – это одна из составляющих подземного водообмена между сушей и морем, представлена в виде источников, выход которых происходит ниже уровня моря в шельфовой зоне. Характер и тип разгрузки подземных вод ниже уровня моря существенным образом контролируется геологическими факторами. Подземные воды, поступающие в морские бассейны, формируются в пределах сопредельной с морем суши (рис.1)

Выходы подземных вод – проявления разгрузки подземных вод в отдельных открытых трещинах на обнажениях коренных пород, в том числе на стенках и дне карстовых полостей.

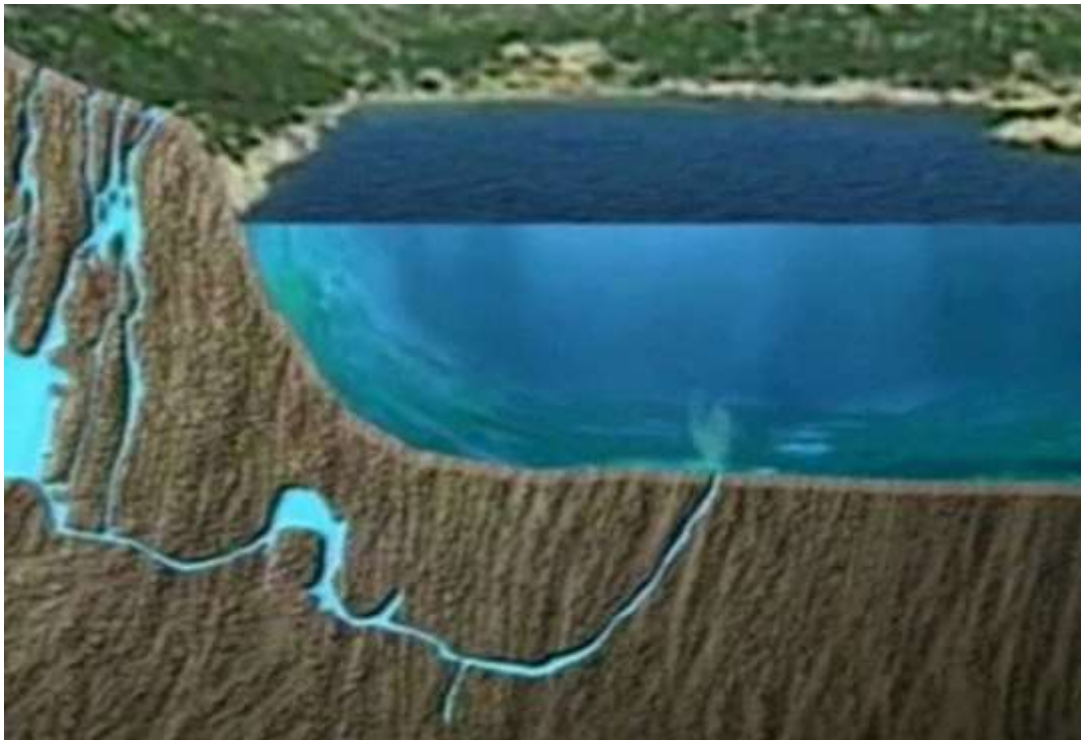


Рис. 1 Схема геологического устройства источников субмаринной разгрузки

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность. Изучение субмаринной разгрузки подземных вод является одним из актуальных вопросов современной гидрогеологии, океанологии и важной темой в исследовании Мирового океана. Ему посвящен ряд международных проектов, в том числе Научного комитета исследования океанов SCOR и МАГАТЭ. Интерес к субмаринной разгрузке обусловлен возможностью использования субмаринных источников для добычи пресной воды.

В Черноморском регионе крупные субмаринные источники известны в Румынии, в Абхазии, а также, у берегов юго-западного Крыма (м. Айя). Учитывая, что Крымский регион находится на грани экологического бедствия в связи с катастрофической нехваткой пресной воды, использование источника у м.Айя могло бы стать одним из решений проблемы водообеспечения региона.

Однако, СРПВ - наименее изученный элемент водного и солевого баланса морей. Важной проблемой является то, что в настоящее время отсутствуют непрерывные массивы данных, позволяющие оценить дебит субмаринной разгрузки подземных вод (СРПВ)[1].

Создание оборудования, позволяющего получать непрерывные данные наблюдений за источниками СРПВ, даст возможность более подробно изучить характер и особенности источников, что, в свою очередь, позволит принять решение о целесообразности их разработки для обеспечения полуострова Крым пресной водой.

Эта идея соответствует и государственным целям в области исследования Мирового океана. Так, на заседании Совета при Президенте РФ по науке и образованию, которое состоялось 8 февраля 2022 года, обсуждался вопрос совершенствования мониторинга сети автоматизированных измерений в океане. Одной из важных задач совершенствования мониторинга для всех направлений морских исследований является обеспечение его непрерывности.

Целью работы являлась разработка автономного буя для непрерывного измерения параметров морской среды (солености, температуры, направления и скорости течения) с целью мониторинга СРПВ в карстовых полостях на побережье Черного моря у м.Айя.

Для достижения поставленной цели в рамках данной работы следовало решить такие **задачи**:

- провести анализ востребованности разрабатываемого оборудования, определить круг задач, при которых может применяться разрабатываемое оборудование;
- определить этапы разработки и внедрения оборудования;
- описать устройство автономного буя, произвести его сборку;
- провести лабораторные испытания экспериментального образца;
- выполнить анализ данных, полученных в ходе испытаний, определить проблемные моменты, требующие доработки, сделать выводы о возможности допуска экспериментального образца к экспедиционным испытаниям.

Объект разработки: оборудование для непрерывного сбора данных наблюдений за источниками СРПВ.

Место разработки: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Морской гидрофизический институт РАН».

Научная новизна: создание данного инновационного оборудования позволит обеспечить сбор непрерывных данных с учетом гидрогеодинамических особенностей источника СРПВ, расположенного у м. Айя.

Потенциальные потребители: оборудование может быть использовано в научных целях при проведении морских исследований, при выполнении гидрологических, гидрохимических, гидрометеорологических работ, для контроля стоков, экологического мониторинга и прочих важных задач.

Личный вклад учащегося. Минов А.Е., под руководством научного руководителя Довгого И.И., принимал участие в процессе обсуждения конструкции автономного буя, сборки его экспериментальной модели, участвовал в проведении лабораторных испытаний, в процессе обработки полученных данных, выполнял анализ полученных результатов, готовил обоснование необходимости разработки.

РАЗДЕЛ 1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

1.1 Исследования источников субмариной разгрузки у м.Айя

Субмаринная разгрузка в Черном море изучена слабо. Описаны источники на юго-западном побережье Крымского полуострова [2], Румынии, многочисленные субмаринные источники известны на побережье Кавказа [3], обширная субмаринная депрессия находится у побережья Абхазии. Однако в сравнении Черноморского региона со Средиземноморским количество работ в изучении субмаринной разгрузки невелико.

Одним из наиболее интересных и перспективных источников СПРВ в Черном море является карстовая полость, расположенная под скальным обрывом, у м. Айя на юго-западном побережье Крымского полуострова (рис.2).



Рис. 2. «Екатерининский грот» у м. Пелекето (район исследования у мыса Айя)

Согласно исследованиям крымских гидрогеологов местом водосбора осадков, формирующих подземные воды юго-западного Крыма, является плато горы Ай-Петри. Далее часть этих подземных вод проходит через Байдарскую и Варнаутскую долину разгружается на м. Айя (рис.3). Поэтому дебит разгрузки зависит от интенсивности осадков в предшествующие периоды.

Изучение и сопоставление взаимосвязей между выпадением осадков в районе г.Ай-Петри и качеством и количеством пресных вод, выходящих в море из

источника СРПВ у м. Айя – важная задача, стоящая перед исследователями на пути к освоению пресных вод этого источника.

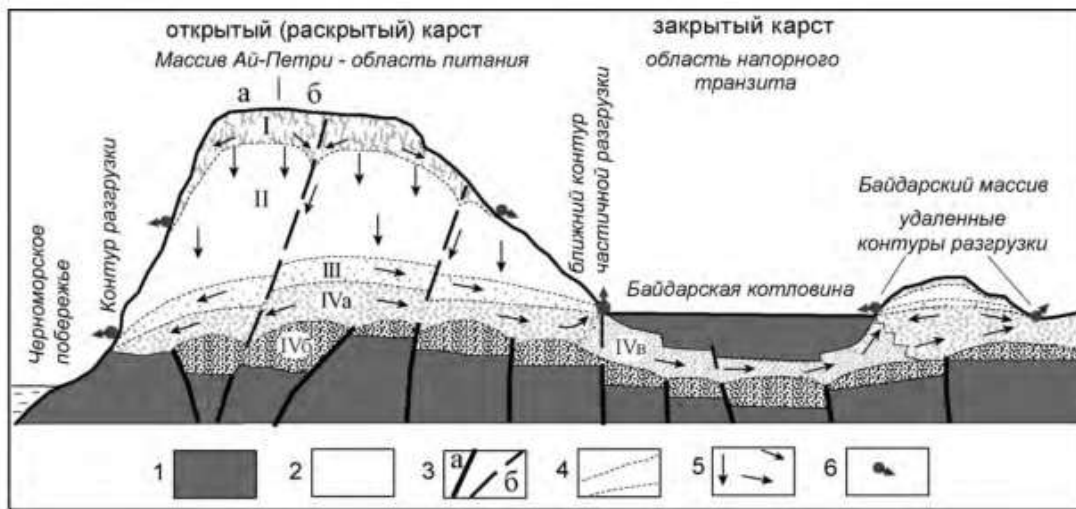


Рис. 3. Формирование подземного стока в юго-западном районе Крымского полуострова.

Условные обозначения: 1 – слабопроницаемые породы, 2 – карстующиеся породы, 3 – тектонические нарушения: 3а – в цоколе, 3б – в карстующихся породах, 4 – границы гидродинамических зон, 5 – направления движения подземных вод, 6 – карстовые источники.

Карстовые массивы: а – цокольные приморские, б – склоновые континентальные. Гидродинамические зоны: I – эпикарстовая (преимущественно рассеянное питание; безнапорные воды, образующие подвешенный горизонт); II – аэрации (вадозная – преимущественно нисходящее свободное движение вод по трещинам и каналам); III – сезонных колебаний уровня (эпифреатическая; перемежающиеся условия зон II и IVа); IV – зона полного насыщения; подзоны: IVа – преимущественно безнапорных вод открытого карста интенсивным водообменом, с локальным напором в каналах (фреатическая); IVб – напорных вод с замедленным водообменом; IVв – напорных вод (артезианского напора) закрытого карста с интенсивным водообменом.

Вопрос возможности каптирования субмаринных источников м. Айя имеет как минимум три значимых аспекта – экологический, экономический и технологический.

1.2 Обоснование актуальности разработки автономного устройства для измерений характерных показателей источников СРПВ у м.Айя.

Поскольку место нахождения источника СРПВ у м.Айя – это карстовая полость открытая к морю с одной стороны, ранее [4] исследователи предложили для определения дебита использовать формулу смешения (1):

$$Q = \iint_{00}^{HL} \frac{U_{cp}(x, y) (A\Phi - A(x, y))}{A\Phi - A_n} dx dy, \quad (1)$$

где Q – поток субмаринных подземных вод;

$U_{cp}(x, y)$ – средняя скорость течения в точке x, y сечения;

L, H – максимальным ширина (7 м) и толщина поверхностного слоя распресненных вод (0,5 м);

$A\Phi$ – фоновое значение параметра (соленость, концентрация биогенного элемента);

$A(x, y)$ – значение параметра (соленость, концентрация биогенного элемента) в точке x, y сечения;

A_n – значение параметра (соленость, концентрация биогенного элемента) в пресной воде.

Таким образом, для оценки дебита источника СРПВ, должны быть получены такие данные о параметрах морской среды, как температура, соленость, направления и скорости течения [5].

Однако, на сегодняшний день важной проблемой, которая стоит перед исследователями, является отсутствие непрерывных массивов данных, позволяющих оценить дебит источников СРПВ. Таким образом, актуальной задачей в исследовании СРПВ является создание автономного устройства, позволяющего получать данные о параметрах морской среды непрерывно в течение заданного времени и без участия человека.

Сама по себе идея автономных буев не нова. Их разрабатывают и создают и иностранные компании, и российские. Например, в Севастополе есть предприятия, занимающиеся разработкой подобного оборудования для определенных целей. Например, ООО «Марлин-Юг» [6].

Однако эти измерительные комплексы создаются под более развитые и востребованные направления морских исследований, чем исследование источников СРПВ. Набор датчиков и приборов в этих измерительных комплексах несколько другой и не соответствует тем параметрам, по которым оценивают

дебет источников субмариной разгрузки. А стоимость таких устройств очень высока.

Вместе с тем, сложность подводных условий, в которых проводится изучение СРПВ, несёт высокие риски потери оборудования. Как в результате воздействия морской стихии, так и в результате вандальных действий людей. Ведь исследуемые источники зачастую находятся неподалеку от берега (как, например, источник у м.Айя), и оборудование приходится оставлять в зоне вероятного доступа человека. В связи с этим, использование дорогостоящего оборудования без постоянного контроля над его сохранностью становится нецелесообразным.

1.3. Этапы разработки и внедрения автономного устройства для измерений характерных показателей источников СРПВ

Идея разработки недорогого, но автономного измерительного комплекса, позволяющего в течение заданного времени получать непрерывные данные о параметрах морской среды с целью исследования источников у м.Айя, была предложена в ФГБУН ФИЦ «Морской гидрофизический институт РАН». Поскольку именно на базе данного учреждения проводились и проводятся многие исследования источников СРПВ в Черном море, проблема недостаточности данных и особенности условий их получения в Черном море и у м.Айя хорошо известна его ученым и специалистам.

Запланированы следующие **этапы разработки**:

1. Постановка задач, которые должно решать разрабатываемое оборудование;
2. Разработка конструкции измерительного комплекса;
3. Подбор комплектующих и деталей с учетом целей разработки и особенностей условий использования;
4. Сборка экспериментального образца;
5. Проведение лабораторных испытаний образца;

6. Устранение ошибок и погрешностей конструкции, обнаруженных при проведении лабораторных испытаний;
7. Проведение натуральных испытаний с экспедицией к месту планируемой работы буя;
8. Обработка и анализ данных, полученных в ходе натуральных испытаний;
9. Совершенствование конструкции буя с учетом выявленных ошибок;
10. Создание двух взаимозаменяемых рабочих экземпляров автономного буя
11. Использование рабочих образцов для исследования источника СРПВ у берегов м.Айя
12. В случае успешной работы оборудования, запуск производства автономного буя с целью более широкого его использования для научной деятельности по освоению Мирового океана.

На сегодняшний день работа над проектом начата и реализованы первые пять этапов, готовится экспедиция для проведения натуральных измерений.

РАЗДЕЛ 2. КОНСТРУКТИВНАЯ ЧАСТЬ

2.1 Описание конструкции автономного буя

Важным требованием к конструкции и комплектующим буя являлось сохранение баланса между плавучестью, максимально долгим периодом автономной работы и низкой себестоимостью изделия. Этим был обусловлен выбор формы устройства и состав его комплектующих деталей.

Задачей разработки было определено разместить датчики, электроды, термопару и микросхемы, необходимые для измерения таких показателей морской воды, как температура, соленость, направления и скорости течения, в водонепроницаемом и плавучем корпусе (рис.4). Для придания автономности, в корпус буя были помещены аккумуляторы высокой емкости. Для считывания данных с карты памяти, размещенной внутри буя, на данном этапе разработки планируется использовать USB-кабель.

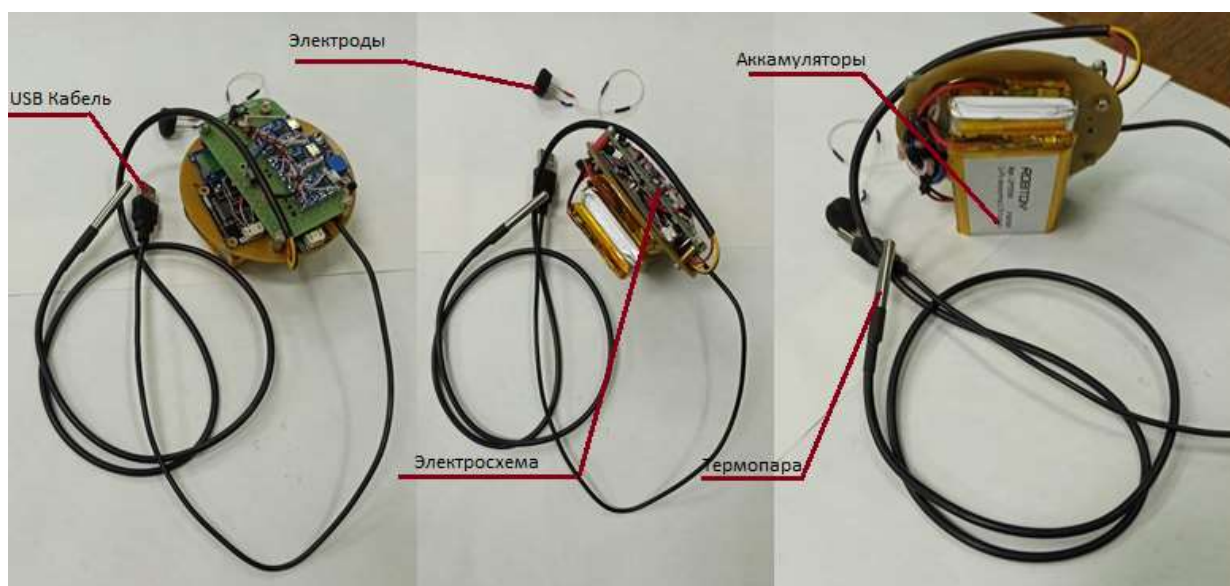


Рис. 4 Электрическое оборудование автономного буя

В качестве измерителя **электропроводности** был использован датчик марки Gravity: Analog Electrical Conductivity Sensor, это аналоговый измеритель

электропроводности V2 специально используется для измерения электропроводности водных растворов, а затем для оценки качества воды (морской, технической и т.д.) (рис.5).



Рис. 5 Измеритель электропроводности

В качестве датчика для измерения **скорости и направления течения** используется 9-осевой сенсор MPU-9250 9DOF — сенсор второго поколения компании InvenSense для определения положения в пространстве, включающий в себя 3-осевой Гироскоп, 3-осевой Акселерометр и 3-осевой Компас (Магнетометр) (рис.6)

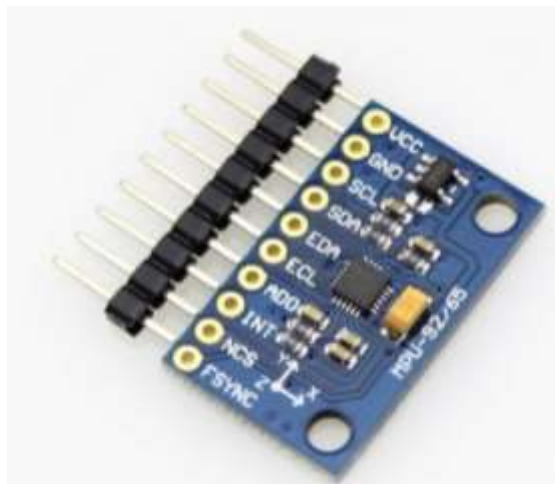


Рис. 6 9-осевой сенсор MPU-9250 9DOF

В качестве датчика **температуры** использован Gravity: Waterproof DS18B20 SensorKit (рис.7) основные характеристики:

Рабочая температура от -55 до 125 °С

Точность измерения от 0,5 °С

Отклонение температуры $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$



Рис.7 Датчик температуры DS18B20

В качестве источника бесперебойного питания, обеспечивающего автономность измерительного комплекса и его работу, был использован литий-полимерный аккумулятор Robiton емкостью 5000 мАч (рис. 8).



Рис.8 Источник бесперебойного питания

Корпус автономного буя должен быть легким, прочным и выдерживать агрессивные условия морской среды. Полученная конструкция должна обеспечить герметичность и бесперебойную работу устройства в морской воде. Материалом для его изготовления был выбран синтетический виниловый полимер метилметакрилата (органическое стекло), в виде сферы, состоящей из двух

одинаковых половинок, с толщиной стенки 20 мм (рис. 9). Основными преимуществами органического стекла, являются устойчивость к действию влаги, бактерий и микроорганизмов, механическая обработка осуществляется почти с такой же лёгкостью, как и обработка дерева, устойчивость в химических средах, а также сопротивляемость удару в 5 раз больше, чем у стекла.



Рис. 9 Корпус и сборка автономного буя

Для проведения исследований буй должен скрепляться с якорем, удерживающим его в точке постановки тросом.

2.2 Проведение лабораторных испытаний экспериментального образца

После выполнения разработки конструкции измерительного комплекса, подбора комплектующих и сборки экспериментального образца автономного буя, были выполнены лабораторные испытания на базе ФГБУН ФИЦ «Морской гидрофизический институт РАН».

Испытания проводились в емкости с дистиллированной водой. Буй был установлен неподвижно датчиками на емкость. Время проведения измерений составило 7,5 часов. В ходе испытаний было установлено, что корпус не допускает течей внутрь устройства. Все датчики работали и передавали данные на карту памяти, установленную внутри буя.

2.3 Анализ данных, полученных в ходе лабораторных испытаний

Анализ данных, полученных по результатам лабораторных исследований, велся по отношению к следующим объектам наблюдений:

1. Показатели надежности и совершенства конструкции экспериментального образца (плавучесть, отсутствие протечек, удобство использования и т.д.);
2. Показатели работы датчиков и передачи полученных ими данных на встроенную карту памяти;
3. Анализ полученных данных, удобства работы с ними и их достаточности для достижения поставленных целей.

В отношении **показателей надежности и совершенства конструкции** экспериментального образца было выяснено, что корпус спроектирован и изготовлен довольно точно. За время проведения эксперимента не возникло течей корпуса и вода не попала внутрь устройства. При этом буй обладал положительной плавучестью даже в условиях дистиллированной воды.

Показатель заряда аккумуляторной батареи снизился до 90 % за 7,5 часов. Таким образом, предположительное время работы буя может составлять от недели до 10 дней.

Вместе с тем, из недостатков конструкции была отмечена необходимость регулярно раскручивать корпус, чтобы получить доступ к карте памяти и для зарядки аккумуляторов. Со временем герметичность соединения может быть нарушена и образованы протечки. Поставлена задача найти технические решения, позволяющие минимизировать количество вынужденной разборки корпуса.

В частности, для решения этой проблемы запланирована установка телефонной сим-карты, позволяющей передавать данные не только на внутреннюю карту памяти, но и на удаленные приемники. Также, необходимо решить в будущем вопрос с вынесением разъема для зарядки аккумулятора на внешний корпус и обеспечением его герметичности.

В отношении **показателей работы датчиков** и передачи полученных ими данных на встроенную карту памяти было установлено, что данные успешно переданы и записаны на карту памяти. При чтении карты они имеют вид (рис.10):

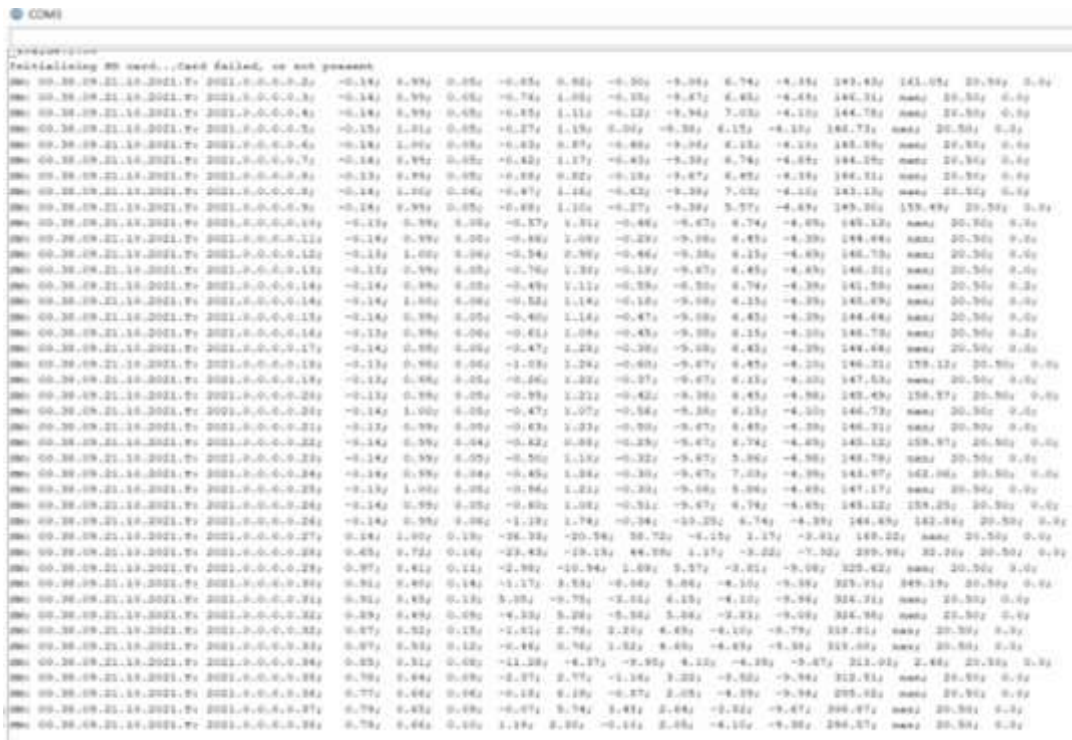


Рис.10 Графическое изображение вывода данных с карты памяти автономного буя

Полученные данные отображают дату выполнения замеров, время и результаты, переданные датчиками. Минимальный интервал проведения замеров может быть установлен, как 1 секунда и более и назначается заранее.

Анализ данных показал, что в настоящее время датчики передают сведения корректно. Датчик температуры достоверно, в сравнении с лабораторным термометром, отображает параметр температуры воды. Датчик электропроводности показывает нулевое значение. Показатели гироскопа, магнетометра и акселерометра практически постоянны, что отображает неподвижное положение прибора.

Однако, имеются сложности с интерпретацией результатов, и предстоит разработать и внедрить программы для автоматического перевода показаний гироскопа, магнетометра и акселерометра в данные скорости и направления течения. Также, необходима калибровка датчика электропроводности, для вывода информации в практических единицах солености.

Кроме того, в ходе выполнения и обсуждения лабораторного эксперимента, была предложена идея установки GPS-датчика на буй, до тех пор, пока его функцию не начнет выполнять сим-карта мобильной связи. Это позволит снизить вероятность утраты устройства в случае разрыва удерживающего троса и поможет в его поиске.

Этап лабораторного испытания экспериментального образца автономного буя выполнен успешно. В ближайшее время запланировано проведение экспедиции для выполнения натурных испытаний в рабочих условиях и в месте проведения исследования источника СРПВ.

ВЫВОДЫ

Проект разработки автономного измерительного буя для непрерывного мониторинга субмариной разгрузки подземных вод у м. Айя - важный этап в деле исследования и освоения источников СРПВ. Он имеет значение не только для вододефицитного Крымского региона, но и в контексте государственных задач по совершенствованию сети автоматизированных измерений в океане.

В настоящий момент из 12 запланированных этапов реализации проекта выполнено только 5. В целом, проект не является оконченным и это связано с его масштабностью и необходимостью значительных материальных ресурсов на реализацию. Однако задачи, поставленные в данной работе, решены.

После завершения проекта полученный измерительный комплекс может иметь широкое применение и быть использован не только с целью исследования источников СРПВ, но и для решения других глобальных задач освоения Мирового океана.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Юровский Ю.Г., Этюды о воде / Ю.Г. Юровский. – Симферополь : ИТ «АРИАЛ», 2014 – 112 с.
2. Кондратьев С.И., Долотов В.В., Моисеев Ю.Г., Щетинин Ю.Т. Субмаринные источники пресных вод в районе мыс Фиолент –мыс Сарыч // Морской гидрофизический журнал. -1998.-№3. – С. 57-69.
3. Evidence for Submarine Groundwater Discharge into the Black Sea – Investigation of Two Dissimilar Geographical Settings / M. Schubert[et al.] // Water. 2017. Vol.9, iss. 7, art. 468. <https://doi.org/10.3390/w9070468>
4. Юровский Ю.Г., Прусов А.В. Методы изучения СРПВ перетеканием. Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь: ЭКОСИ Гидрофизика, 2010. вып.22. с.116 126.
5. С.И. Кондратьев, А.В. Прусов, Ю.Г. Юровский Наблюдения субмаринной разгрузки подземных вод (Южный берег Крыма), 2010.
6. <https://marlin-yug.com/ru/products/>