

Федеральное Государственное Бюджетное Образовательное  
Учреждение высшего образования  
«Санкт-Петербургский государственный университет»  
Институт Наук о Земле

*БУНИИ Владимир Олегович*

**Выпускная квалификационная работа**

*Величина и вариации объёмной активности радона в воздухе*

*Саблинских пещер*

Уровень образования: бакалавриат

Направление *05.03.06 «Экология и природопользование»*

Основная образовательная программа: *СВ. 5024 «Экология и природопользование»*

Профиль: *05.03.06 «Экология и недропользование»*

Научный руководитель:  
канд. б. наук,  
доцент О.С.Изосимова



« 20 » \_\_\_\_\_ мая \_\_\_\_\_ 2021 г.

Рецензент:

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2021 г.

Заведующая кафедрой:  
канд. геол.-мин. наук,  
доцент И.В.Федорова

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2021 г.

Санкт-Петербург

2021

## Оглавление

Введение .....	3
2. Литературный обзор.....	4
1. Природные условия района работ .....	6
1.1 Физико-географический очерк .....	6
1.2 Геологическое строение .....	7
1.3 Гидрогеологические условия.....	12
1.4 Полезные ископаемые .....	13
2. Радон .....	15
3. Саблинские пещеры .....	18
3. Аппаратура и методика измерений.....	20
3.1 Описание радиометра.....	20
3.2 Отбор проб воздуха на аэрозольный фильтр .....	21
3.3 Техника измерений с РГА-02Т по методу Ролле .....	25
3.4 Обработка результатов измерений.....	27
4. Результаты исследований .....	28
4.1 Величина и вариации объёмной активности радона .....	28
4.2 Оценка влияния радона на биологические объекты на примере комаров вида <i>Culiseta annulata</i> .....	35
Заключение.....	38
Список литературы.....	39
Благодарности .....	41

## Введение

Геоэкологические исследования проводятся для оценки современного состояния и прогноза возможных изменений окружающей природной среды под влиянием антропогенной нагрузки с целью предотвращения, минимизации или ликвидации вредных и нежелательных экологических и связанных с ними социальных, экономических и других последствий и сохранения оптимальных условий жизни населения.

При оценке радиационной обстановки, измерение ОАР (объёмной активности радона  $^{222}\text{Rn}$ ) особенно актуально, так как он вносит основной вклад в естественную радиоактивность атмосферного воздуха и в уровни облучения окружающей среды и человека за счёт естественных источников радиации.

Целью работы являлось определение уровня равновесной объёмной активности  $^{222}\text{Rn}$  (ОАР) в пространстве Саблинских пещер Жемчужная, Псевдо Санта-Мария, Штаны (Тосненский район, Ленинградская область) в зимний период, а также оценка возможного влияния радона на биологические объекты на примере комаров вида *Culiseta annulata*.

В это время здесь зимуют совки, комары, амфибии, летучие мыши и другие представители животного мира, на жизнедеятельность которых может влиять повышенное содержание радона в воздухе подземного пространства.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие основные задачи:

1. Провести полевые исследования с измерением ОАР в подземном пространстве Саблинских пещер Жемчужная, Псевдо Санта-Мария, Штаны в зимний период.
2. Отобрать комаров вида *Culiseta annulata* в привходовых частях Саблинских пещер.
3. Оценить величину и вариации ОАР в разных залах пещер, включая привходовые и расположенные в глубине, далеко от входа.
4. Сравнить индекс массы тела у комаров вида *Culiseta annulata* из пещер с разными значениями ОАР.

В качестве исходного материала в работе использовались данные исследований по 29 измерениям ОАР в пространстве Саблинских пещер Жемчужная, Псевдо Санта-Мария, Штаны (Тосненский район, Ленинградская область) за период с 07.12.2019 по 06.03.2020.

## 2. Литературный обзор

По результатам, проведённых ранее, ежемесячных наблюдений за уровнем объемной активности радона в разных залах пещеры «Жемчужная» (2009–2010 гг.), величина ОАР варьирует от 4500 до 32700 Бк/м<sup>3</sup>, а среднегодовой уровень ОАР во всех исследованных залах пещеры «Жемчужная» за весь период наблюдений составил 13120 Бк/м<sup>3</sup> [1,2].

В январе 2019 г. осуществлялись измерения в 10 точках опробования в разных залах пещер «Жемчужная» и «Штаны» (правый берег р. Тосна) [3]. В этом исследовании, в отличие от предыдущего, ОАР измерялась не только в глубинных залах пещер, но и в привходовых частях. В каждой из точек ставили угольные адсорберы сроком на 2 суток. Затем колонки снимали и увозили для измерений в ФГУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в городе Санкт-Петербург».

Как показали данные исследований с угольными адсорберами, ОАР варьируется в больших пределах: от <100 до 12430 Бк/м<sup>3</sup> [3]. Большие значения наблюдались в тех залах, где диктионемовые сланцы, являясь источником радона, контактируют непосредственно с воздушным пространством. Наименьшие значения зарегистрированы там, где пол, потолок и стены ниш или залов представлены чистыми кварцевыми песками саблинской свиты. Максимальные значения ОАР выявлены вплотную к пластам аржиллитов, обнажившихся естественным путем, а промежуточные — среди искусственно созданных навалов аржиллитов в нишах кварцевых песков. Несмотря на близость выходов пещер, а, следовательно, высокую подвижность воздушных потоков, вариативность температуры и влажности, уровень ОАР практически во всех случаях превышает фоновый (100 Бк/м<sup>3</sup>). Следовательно, для изучения биологического воздействия радиации на сезонных обитателей пещер возможно определить залы с устойчиво высоким и низким уровнем ОАР с целью организации наблюдений с основной и контрольной группой организмов.

Распределение кровососущих комаров в Саблинских пещерах характеризуется следующими особенностями. Исследования различий в распределении зимующих самок кровососущих комаров из родов *Culex* и *Culiseta* (*Diptera*, *Culicidae*) в привходовых частях пещер и связей с разными требованиями к температуре и влажности воздуха, проведённые в зимний период 2020 года в привходовых частях Саблинских пещер показали, что самки рода *Culiseta* (преимущественно *Cs. annulata*) по сравнению с самками рода *Culex* (в основном *Cx. pipiens*) занимают, как правило, более прохладные

участки пещер при совместной зимовке. Результаты измерений температуры внутри пещер, выполненных в период зимовки комаров при наружной температуре от +0,6 до 2,0 °С показали, что температура в привходовых частях пещер (от +3,4 до +7,4 °С) была значимо ниже, чем в глубине пещер, где значения варьировали от +6,7 до 8,9 °С ( $p = 0,00029$ ). В сравнении значений влажности воздуха, выполненном аналогично сравнению значений температуры, статистически значимое различие не выявлено ( $p = 0,21$ ) [4].

Влияние естественной радиоактивности, вызванной присутствием радона в пещерах, ранее исследовалось на других насекомых, а именно на сверчках, обитающих в пещерах Италии.

Результаты по измерению объемной активности радона в пещерах на территории Италии показали, что значения варьируются от 200 до 26000 Бк/м<sup>3</sup>. Оценка влияния радона на биологические объекты на примере пещерных сверчков двух близкородственных видов *Dolichopoda geniculata* и *Dolichopoda laetitiae* из 10 популяций показала, что радон, по-видимому, оказывает влияние как на объекты, отобранные при низких концентрациях, так и при высоких концентрациях. Исследования связей между концентрацией радона и уровнем генетического полиморфизма позволили предположить, что образцы, полученные из пещер с самой высокой концентрацией радона, имеют самые высокие оценки изменчивости у обоих видов. Также у них обнаружена специфическая категория ядерной ДНК, которая, по-видимому, хорошо отражает влияние радона на генетический материал насекомых. [5]

# 1. Природные условия района работ

## 1.1. Физико-географический очерк

Ленинградская область – одна из северо-западных областей Российской Федерации, которая расположена на северо-западе Восточно-Европейской равнины и прилегает к Финскому заливу Балтийского моря на протяжении 330 километров. На северо-западе область граничит с Финляндией, а на западе область граничит с Эстонией по реке Нарве – государственные границы Российской Федерации. На юго-западе Ленинградская область граничит с Псковской областью, на юге и юго-востоке – с Новгородской областью, на востоке – с Вологодской областью и на северо-востоке – с Республикой Карелией.

Санкт-Петербург является центром Ленинградской области, занимает крайнюю западную часть Приневской низменности по обоим берегам реки Невы, острова невской дельты и прилегающее к устью Невы побережье Невской губы Финского залива, однако не входит в состав области, будучи самостоятельным субъектом Российской Федерации. Река Нева и два ее главных рукава – Большая Невка и Малая Нева разделяют всю территорию города на три части. Ленинградская область находится в умеренных широтах северного полушария, располагаясь между  $58^{\circ} 26'$  и  $61^{\circ} 20'$  северной широты и  $27^{\circ} 45'$  и  $35^{\circ} 40'$  восточной долготы. Площадь Ленинградской области 85,9 тыс. кв. км, что составляет примерно 0,5% площади Российской Федерации.

Климат региона определяется как его расположением в северных широтах, так и воздействием морских и континентальных воздушных масс умеренных широт. Санкт-Петербургский регион находится в зоне влияния атлантико-континентального климата, характеризующегося избыточным увлажнением, обусловленным интенсивной циклонической деятельностью. Расположение в северных широтах определяет угол наклона солнечных лучей к поверхности и продолжительность дня, а, следовательно, приход и расход солнечного тепла. Разница между поступлением солнечного тепла и его расходом в области – положительная. В совокупности всех климатообразующих факторов формируется климат, близкий к морскому, с умеренно теплым влажным летом и довольно продолжительной, умеренно холодной зимой. Частая смена воздушных масс связана с прохождением многочисленных атмосферных фронтов и циклонов, что определяет неустойчивую погоду во все сезоны. С запада и юго-запада, со стороны Атлантического океана, влияние Азорского максимума и Исландского минимума, откуда поступает влажный морской воздух, оказывающий смягчающее влияние на климат. С севера и северо-востока, из полярной области высокого давления, приходит сухой и

холодный арктический воздух. С востока и юго-востока к Санкт-Петербургу приходит континентальный воздух, приносящий сухую и ясную погоду, который сформировался в области высокого давления на территории Центральной Азии.

Средняя годовая температура воздуха понижается с запада на северо-восток от +4,5° до +2,0°. Относительная влажность воздуха 70-90% во все месяцы. «В среднем за год по области выпадает 550-850 мм осадков, в городе – 618 мм осадков, причем более 70% - в теплый период. Максимум осадков приходится на август (84 мм), а минимум – на март (32 мм)» [6]. Облачность составляет в холодный период 75-85%, а в теплый – 50-60%. В Санкт-Петербурге преобладают ветра западного, юго-западного и южного направлений (больше 50%). Ветры преобладающих направлений являются наиболее сильными – 3,3-3,7 м/с. Штиль 12%. [7, 8]

## ***1.2 Геологическое строение***

Территория Санкт-Петербурга и Ленинградской области расположена в пограничной зоне между двумя геологическими структурами: Русской плитой Восточно-Европейской платформы, образованной древними осадочными породами и выступом фундамента платформы – Балтийским щитом, который сложен сильно дислоцированными метаморфическими сланцами и гнейсами, прорванными гранитоидами архея и протерозоя с возрастом от 1,7 до 3,5 млрд. лет. Русская плита Восточно-Европейской платформы сложена мало измененными осадочными горными породами венда, раннего палеозоя и девона, залегающими с очень пологим, падением к югу - юго-востоку. Эти отложения формировались в течение многих миллионов лет, в обширных мелководных эпиконтинентальных морях, покрывавших значительные области территории. Развитие морей началось около 600 млн лет назад, во второй половине вендского периода. Морские трансгрессии неоднократно сменялись регрессиями, в ходе которых территория на большее или меньшее время превращалась в сушу. В Санкт-Петербурге кристаллический фундамент залегает на глубине от 175 м на северо-западе до 250 м на юго-востоке. Сложен верхнепротерозойскими породами рифея и венда - гранитами, гнейсами и диабазами. В протерозойский и палеозойский (нижнекембрийский и ордовикский) периоды истории Земли вся территория современного Санкт-Петербурга и пригородов была покрыта морем. В процессе осадконакопления на дне древнего моря сформировался мощный слой осадочных отложений – песков, песчаников, глин и известняков, которые покрывают кристаллический фундамент.

Разрез осадочного чехла в основании представлен отложениями вендского комплекса (редкинский и котлинский горизонты), моноклиально залегающими на

кристаллическом фундаменте. Редкинский горизонт в нижней части представлен преимущественно песчаниками и алевролитами мощностью 10-30 м, перекрытыми аргиллитоподобными глинами и алевролитами мощностью не более 10-15 м. В Котлинском горизонте выделены нижний и верхний подгоризонты. К нижнему подгоризонту приурочены гдовские слои с преобладанием песчаников и алевролитов мощностью до 30 м. Гдовские слои залегают в основном на отложениях редкинского горизонта, а в местах их выклинивания непосредственно на породах кристаллического фундамента. Залегающие выше отложения верхнего Котлинского подгоризонта представлены мощной толщей (до 150 м) переслаивающихся глин с редкими прослоями песчаников.

Кембрийская система нижнего отдела начинается с Ломоносовской свиты, которая непосредственно залегает на размытой поверхности вендских терригенных отложениях. Свита обнажается лишь в небольших обнажениях по берегам Финского залива и сложена неравномерно переслаивающимися песчаниками, алевролитами и глинами. Песчаники преимущественно кварцевые, мелкозернистые и среднезернистые, имеют светло-серую окраску, иногда с зеленоватым, желтоватым и розоватым оттенком, тонкогоризонтально- и косослоистые. Глины в различной степени песчанистые и алевроитистые, зеленовато-серого цвета; присутствуют в виде тонких прослоев и линз. Общая мощность свиты около 30 м.

Выше располагается Сиверская свита, так называемые «голубые глины» Нижняя и верхняя границы свиты выражены неотчетливо, так как литологический состав отложений, слагающих нижнюю и верхнюю части ее разреза, близок к литологическому составу подстилающих и перекрывающих пород. Выходы глин приурочены главным образом к карьерам и каньонообразным долинам некоторых рек Балтийско-Ладожского глинта. Свита представлена сравнительно однообразной толщей пластичных глин голубовато- и зеленовато-серого цвета. Глины в той или иной мере алевроитистые, тонкослоистые.

Средний отдел Кембрийской системы начинается с Саблинской свиты. Нижняя подсвита сложена светлыми, желтоватыми, розоватыми тонкослоистыми песчаниками, иногда полностью отбеленными. Песчаники преимущественно кварцевые (содержание кварца до 99,9%), разнозернистые, преимущественно средне-мелкозернистые, слабо сцементированные. Песчаники подсвиты характеризуются чередованием слоев с тонкогоризонтально-слоистой, волнистой, слоистостью ряби и плоскопараллельной косой слоистостью. В слоях с волнистой слоистостью отмечаются прослой серых песчанистых глин, в слоях с косой слоистостью встречаются отдельные зерна, реже - гнезда и линзы

мелкого кварцевого гравия. Мощность до 3 м. Совокупность признаков указывает на накопление песчаников нижней подсвиты в условиях побережья, с преимущественным влиянием приливно-отливных процессов. Средняя подсвита представлена средне-тонкозернистыми песками, окрашенными в желтые и розовые цвета мягких пастельных тонов, местами песчаники отбелены. Они слагают невыдержанные по простиранию серии разнонаправленной плоскопараллельной косой слоистости, мощностью 5-120 см. Образование подобных текстур происходило за счет миграции подводных песчаных дюн с прямыми гребнями по дну мелкого моря. Местами косые серии разделены тонкими линзовидными прослоями глин, которые скорее всего отлагались из спокойных вод между дюнами или небольшими островами. Мощность подсвиты до 10 м. Верхняя подсвита представлена среднезернистыми и средне-мелкозернистыми косослоистыми кварцевыми песчаниками слабоцементированными, местами в основании содержащими заметную примесь крупных и грубых песчаных зерен. Она характеризуется присутствием редких разрозненных створок раковин органико-фосфатных брахиопод. Мощность подсвиты весьма изменчива, от 0 до 2-3 м.

Верхний отдел Кембрийской системы включает в себя Ладожскую свиту, которая сложена преимущественно светлоокрашенными, нередко белыми или светло-серыми песчаниками кварцевыми с большей или меньшей примесью обломков раковин органико-фосфатных беззамковых брахиопод и прослеживается в обнажениях Балтийско-Ладожского глинта от Дудергофских высот на западе до долины р. Сясь на востоке.

Ордовикская система нижнего отдела начинается с Госненской свиты, которая сложена преимущественно средне-мелкозернистыми и среднезернистыми песками и песчаниками кварцевыми и фосфорито-кварцевыми с характерной разнонаправленной троговой косой слоистостью, преимущественно серо-розового цвета с палевым оттенком. Местами отложения свиты изобилуют остатками беззамковых брахиопод рода *Obolus*, имевших фосфатную раковину. Местами концентрации фосфата кальция настолько велики, что формируются месторождения сырья для производства фосфатных удобрений. Мощность свиты не превышает 7,5 м.

Выше по разрезу пески Госненской свиты сменяются Копорской свитой, которая представлена темно-коричневыми, почти черными битуминозными сланцеватыми аргиллитами с прослоями песчаников преимущественно в нижней части. В геологической литературе за этой породой закрепилось традиционное название "диктионемовые сланцы". Битуминозные аргиллиты тонкослоистые, тонкоплитчатые, с ровными, гладкими плоскостями напластования, местами содержат прослои и линзы

песчаников. Довольно часто в сланцах встречаются скопления крупных кристаллов и конкреций антраконита, пирита, рассеянные кристаллы гипса, а также налеты серы. Мощность ее изменяется от 0 до 5,5 м.

Леэтсеская свита представлена кварц-глауконитовыми и глауконитовыми глинистыми биотурбированными (многократно перемешанными роющими животными еще на стадии осадконакопления) песками, глинами, песчанистыми и биокластическими известняками. Кварц-глауконитовые и глауконитовые пески слагают нижнюю часть свиты. Присутствие большого количества зерен глауконита окрашивает эту породу в темно-зеленый цвет, часто с красновато-фиолетовыми, охристо-желтыми и буровато-красными пятнами и полосами. Последние являются результатом окисления аутигенного пирита. Полнота разрезов свиты максимальна в самых северных выходах на Балтийско-Ладожском глинте. Вверх по разрезу свиты кварц-глауконитовые и глауконитовые пески постепенно переходят в известковистые песчаники и песчанистые известняки, которые в свою очередь сменяются сначала глинистыми известняками с редкими зернами глауконита и прослоями глин, а затем более плотными пестрыми слабоглинистыми биотурбированными глауконитовыми известняками. Последние относятся к нижней части промышленной пачки "дикарей". "Дикари" - это наиболее прочные слои глауконитовых известняков, встречающиеся только в верхней части леэтсеской и нижней части волховской свит на Балтийско-Ладожском глинте и используемые в строительстве и отделке зданий Санкт-Петербурга с момента его основания. В песчанистых и глинистых известняках леэтсеской свиты, переходных от глауконитовых песков к "дикарям", появляются многочисленные маленькие иловые холмы - примитивные рифовые постройки. Они имеют вид пологих, округлых или овальных в плане сводов, размером от первых десятков сантиметров до нескольких метров, которые возникли при облекании известняковыми пластинами линзовидных тел карбонатных глин. Мощность леэтсеской свиты от 0,5 до 3,45 м.

Волховская свита сложена глауконитовыми биокластическими известняками и состоит из трех подсвит: нижней, средней и верхней. Нижнюю слагают наиболее плотные и относительно толстые пласты пестрых биотурбированных известняков, которые все еще относятся к "дикарям". "Дикари" волховского горизонта хорошо распознаются и имеют максимальные мощности на востоке Балтийско-Ладожского глинта, но несколько утоняются и нередко утрачивают индивидуальные признаки в западных и южных обнажениях. Мощность подсвиты изменяется от 0,7-0,8 м до 2,2 м. Средняя подсвита волховской свиты характеризуется меньшими мощностями и большей глинистостью слоев глауконитовых известняков, наличием частых прослоев и линз глин

между ними, а также преобладанием красных и желтых окрасок. Плитомы окрестностей Санкт-Петербурга задолго до появления официальной местной стратиграфической схемы называли толщу пород средней подсвиты "желтяками". Мощность изменяется от 0,4 до 2,0 м. Верхняя подсвита волховской свиты представлена переслаиванием светлоокрашенных зеленовато-серых с бордовыми пятнами и разводами биотурбированных глауконитовых известняков с бордово-серыми, реже зеленовато-серыми глинами. Традиционное название подсвиты - "фризы", заимствованное из терминологии плитомов, вероятно, обусловлено тем, что из-за вымывания глин дождями в вертикальных стенках карьеров слои известняков образуют отчетливые рельефные выступы. Мощность 0,9-4,0 м.

Силлаоруская свита представлена глинистыми известняками, мергелями и глинами, в которых неравномерно рассеяны бурые уплощенные оолиты, состоящие из гидроокислов железа разных размеров и степени оформленности. Мощность силлаорусской свиты достигает 0,8 м. Наиболее часто в породах свиты встречаются брахиоподы, трилобиты.

Обуховская свита сложена преимущественно известняками, местами слабо доломитизированными, глинистыми. В нижней части свиты присутствуют визуально наблюдаемые мелкие зерна глауконита, количество которых сокращается в восточном направлении, и в том же направлении увеличивается глинистость отдельных слоев и пачек. Общая мощность обуховской свиты от 4,2 м до 7,85 м. Вышележащие свиты также представлены в виде известняков, мергелей и доломитов, которые простираются до четвертичных отложений.

Четвертичные отложения распространены повсеместно. Мощность их колеблется от 1-5 м. на Ордовикском плато, в черте города от 30 до 50 м. В пределах Ленинградской области, в направлении с севера на юг - юго-восток, выделяют пять орографических зон, последовательно сменяющих друг друга: Предглинтовая низменность, Балтийско-Ладожский глинт (Ордовикский глинт) - уступ на границе низменности и плато; возвышенное Ордовикское плато, к которому с юга примыкает обширная заболоченная Девонская равнина, в свою очередь ограниченная следующим Валдайско-Онежским глинтом (Карбоновым уступом). Строение каждой из них напрямую зависит от того, какие именно породы осадочного чехла слагают данную зону [9]. Образование современного рельефа Санкт-Петербурга и Ленинградской области связано с событиями, происходившими 12000 лет назад. Вся территория Санкт-Петербурга и его окрестностей была покрыта ледяным панцирем толщиной 2000 м, произошло это в результате движения ледника с территорий Скандинавского полуострова. Потепление земного

климата привело к таянию льда, и он начал отступать на север, откуда пришёл. При этом на равнинах, испытавших оледенение, оставались массы песков и глин, переполненных валунами различных кристаллических пород. Во время отступления ледника образовывалось приледниковое озеро, которое впоследствии сменилось морским бассейном. Это и являлось фактором образования четвертичных отложений (ледниковые, флювиогляциальные, озёрно-ледниковые, речные, озёрные, морские, торфяно-болотные, техногенные). [10, 11]

### ***1.3. Гидрогеологические условия***

Роль подземных вод в современном мире неопределимо велика: орошение сельскохозяйственных угодий, водоснабжение жителей городов, питание рек и озёр. Особенно важны они в тех местах, где мало поверхностных источников водоснабжения.

Подземные воды Санкт-Петербурга и Ленинградской области приурочены как к четвертичным, так и к дочетвертичным породам, которые расположены в северо-западной части Московского артезианского бассейна. Водоносность кристаллического фундамента связана главным образом с корой выветривания и зоной экзогенной трещиноватости. Водообильность горизонтов большей части региона неравномерная, а в некоторых местах артезианские воды вообще отсутствуют и для водоснабжения используются поверхностные или грунтовые воды неглубокого залегания. Уровень грунтовых вод обычно устанавливается на глубине около 1 м. Кровля межморенных водоносных горизонтов залегает на глубине 4-20 м.

Гидрогеологический разрез начинается с высоконапорного гдовского водоносного горизонта (Вендский водоносный комплекс), ресурсы которого находятся на глубине около 200 м, непригодны для питьевого водоснабжения, так как их минерализация на 2-3 г/л превышает санитарную норму. Используются как лечебно-столовые воды и служат основным водозабором для технического водоснабжения предприятий Санкт-Петербурга. Выше располагается напорный Ломоносовский водоносный горизонт (Ломоносовский водоносный комплекс), содержащий солоноватые и солёные воды. Расположен между двумя водоупорами глин с глубиной залегания от 1-14 м вдоль побережья Финского залива и возрастает до 300 м в южном направлении. Воды Ломоносовского водоносного горизонта, в основном, гидрокарбонатно-хлоридные натриевые с минерализацией 0,5-0,7 г/дм<sup>3</sup>. К югу от Балтийско-Ладожского уступа развиты ещё два водоносных горизонта: первый – Кембро-Ордовикский, расположенный в песках и песчаниках с маломощными прослоями глин и алевролитов на глубине от 1-10 м вдоль глинта до 10-400 м в юго-восточном направлении, второй – Ордовикский,

расположенный в закарстованных и трещиноватых известняках и доломитах. Мощность комплекса увеличивается в юго-восточном направлении от 5 до 130 м. Разгрузка водоносных горизонтов происходит вдоль уступа в виде многочисленных источников и пластовых выходов, которые дают начало поверхностным водотокам, в том числе рекам Ижора, Славянка, Дудергофка, Стрелка, Шингарка. Воды четвертичного комплекса гидрокарбонатные с минерализацией 0,2-0,3 г/дм<sup>3</sup>, по катионному составу смешанные. В большинстве случаев содержание железа превышает нормы, содержание фтора в несколько раз ниже нормы.

Значительная территория мегаполиса лишена подземных пресных источников водоснабжения, однако большая часть области достаточно обеспечена пресными подземными водами. Мощность слоя подземных вод составляет в большинстве районов 100-200 м, а дебит скважин 1-5 л/с. Больше всего подземных пресных вод в возвышенных районах Карельского перешейка, Ижорской и Вепсовской возвышенностей. Мощность слоя подземных вод превышает 200 м, а дебит скважин составляет 5-10 л/с. Меньше пресных подземных вод на низменностях Приневской, а также прибрежных – вдоль южных берегов Ладожского озера и Финского залива. В Санкт-Петербурге насчитывается более 30 внутренних водоемов, которые представляют собой конечные звенья миграции химических элементов со значительной части территории города и служат индикаторами специфики загрязнения конкретных микрорайонов. Мониторинг подземной гидросистемы позволит предотвратить загрязнение, возникающее как из-за агропроизводства, так и в результате возрастания площадей, занятых свалками и хранилищами осадков очистных сооружений. [12]

#### ***1.4. Полезные ископаемые***

Геологическое строение обуславливает комплекс видов твердых полезных ископаемых, представленных на территории Ленинградской области, а также определяет их состав, условия залегания и размещение. В основной части — это полезные ископаемые, связанные с четвертичными отложениями (торф, пески, глины и т.п.). С более древними породами ордовикского возраста, ограниченно распространенными в южной части города, связаны скопления фосфоритов, не имеющие в настоящее время промышленного значения. Здесь же выявлены повышенные содержания урана. Большинство месторождений полезных ископаемых выявлены и разведаны на территории города в сороковые-шестидесятые годы. Основная их масса представлена глинами, пригодными для изготовления кирпича и керамзита. Ленинградская область обладает запасами гранита, известняка, кирпичной и огнеупорной глины, строительного

и формовочного песка и других строительных материалов, минеральных красок (озерно-болотное происхождение: Паргололовское I и Паргололовское II с запасами 3 и 5 тыс. т сырья соответственно, но в 1990 г. их запасы были списаны с баланса, как утратившие промышленное значение в связи с изменением требований стандарта к сырью и непригодностью для производства художественных красок). Имеются источники минеральных вод.

Гранит добывают на севере Карельского перешейка, где древний кристаллический фундамент выходит на поверхность. Применяется для декоративной отделки зданий, постаментов памятников.

Известняки сосредоточены вдоль глинта и в районе города Пикалева, на востоке области. Используются для кладки фундаментов, облицовки зданий, для мощения тротуаров. Менее плотные известняки служат сырьем для приготовления извести, а некоторые их виды (доломиты) используются как сырье для цемента.

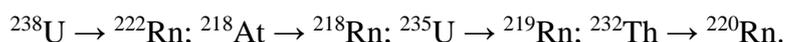
В 30-50-е годы XX века на территории области было разведано 20 месторождений глинистого сырья, на базе которых работали кирпичные заводы небольшой мощности. Распространены на Карельском перешейке в районе ст. Белоостров, Дибуны, Песочная, Левашово, а также в Приневской низменности. В 60-е годы, в связи с ликвидацией заводов, оставшиеся запасы были списаны с балансового учета, как утратившие промышленное значение.

Горючие сланцы – топливо и ценное химическое сырье, используемое для получения горючего газа и многих химических продуктов. Крупное месторождение горючих сланцев находится в районе города Сланцы, на западе области. Пласты сланцев залегают в нём между пластами известняков на глубине 80-300 м.

На территории Ленинградской области разведаны 29 месторождений торфа, из которых: 22 числятся на территориальном балансе запасов торфа по торфяным месторождениям Санкт-Петербурга, запасы 5 месторождений списаны с баланса, 1 – выработано, 1 – не стояло на балансе. В настоящее время добыча торфа на территории области не ведется и не планируется.

## 2. Радон

Радон – тяжёлый, бесцветный, радиоактивный газ, название которого произошло от радия. Газ открыт в 1900 г. Английским физиком Э. Резерфордом. Атомный номер 86. Атомный вес 222,0176. Радиус атома 2,14 Å. В природе существуют следующие изотопы радона:  $^{218}\text{Rn}$  ( $T_{1/2} = 0,019$  с),  $^{219}\text{Rn}$  или актинон (An,  $T_{1/2} = 3,92$  с),  $^{220}\text{Rn}$  или торон (Tn,  $T_{1/2} = 54,5$  с) и  $^{222}\text{Rn}$  или истинный радон ( $T_{1/2} = 3,82$  суток). Изотопы радона образуются при радиоактивном распаде:



Изотопы радона распадаются с испусканием  $\alpha$ -частиц и образуют изотопы полония Po. Наибольшее содержание в природном радоне имеет его самый долгоживущий изотоп,  $^{222}\text{Rn}$ .

Кларк радона в земной коре  $n \cdot 10^{-16}$  %, атмосфере –  $7 \cdot 10^{-17}$  %, речных и питьевых водах содержится 0,37-3,7 Бк/л, артезианских 10-40 Бк/л, лечебных водах – более 100 кБк/м<sup>3</sup>. Радон вносит основной вклад в естественную радиоактивность атмосферного воздуха и в уровни облучения окружающей среды и человека за счёт естественных источников радиации. Природный радон образуется в радиоактивных рудах, постоянно поступает в атмосферу и в гидросферу. Из-за своей химической инертности радон довольно легко удаляется из кристаллической решётки радиоактивных минералов. Больше всего радона у поверхности Земли. В помещениях содержание радона в среднем в 5 раз выше, чем на открытом воздухе, а в подвалах – выше от 8 до 25 раз. Над гранитными интрузиями, в которых повышенное содержание урана, радона много, тогда как над морской поверхностью его почти нет. Возрастает содержание радона перед и при землетрясениях. Предельное годовое поступление радона в лёгкие человека – 146 МБк/год. [12]

Радон находится во всех горных породах, содержащих уран, торий и радий, поскольку радон образуется непосредственно из радия, который, в свою очередь, является продуктом распада урана и тория. Естественно, что повышенное содержание радона характерно для пород, обогащенных этими элементами — для кислых магматических пород (гранитоидов), углеродистых сланцев и некоторых других.

Радон — химически инертный газ, поэтому он относительно легко покидает кристаллическую решетку «родительского» минерала и попадает в подземные воды, природные газы и воздух. Миграция радона в земной коре происходит в газообразном или в растворенном состоянии. Выделяют два основных механизма перемещения — диффузию и конвекцию. Механизм диффузии позволяет перемещаться до 10%

первоначального количества радона в воздухе на 5 м и в воде на 5 см. Другим возможным механизмом передвижения радона является его конвективное перемещение с потоками воды или воздуха. Это основной процесс, определяющий распределение радона в природе.

Содержание радона в подземном воздухе зависит не только от содержания в породах урана и тория, но и от эманлирующей способности пород. Представление об этой способности дает коэффициент эманирования, равный отношению количества радона, выделяемого породами, к его количеству, образовавшемуся в этих породах за тот же интервал времени. Его величина зависит от характера породы, ее структуры и степени раздробленности. Средний коэффициент эманирования для кислых изверженных пород близок к 10%, но граниты в зонах тектонических нарушений характеризуются уже величиной 25% (до 32%). Осадочные горные породы обладают слабым эманированием, в среднем 6%. Присутствие в изверженных или осадочных породах урановых минералов резко увеличивает коэффициент эманирования, в отдельных случаях он достигает 92%, а в среднем составляет 20 - 40% (Попов, Куцель, 1962). Повышенным выделением радона характеризуются рыхлые и сильнотрещиноватые породы (зоны тектонических нарушений, коры выветривания и др.). Содержание эманаций в грунте увеличивается с глубиной и достигает постоянных величин на глубине 5 м.

Одна из форм миграции радона — передвижение его в растворенном состоянии. Из горных пород, содержащих уран, торий или радий, радон попадает в подземные воды. Чем выше концентрации «материнских» радионуклидов в породах, коэффициент эманирования и скорость передвижения воды, тем больше концентрация радона в подземных водах.

Наиболее высокие концентрации радона, 500 Бк/л и выше [13], имеют подземные воды трещиноватых массивов кислых магматических пород, значительно ниже — воды основных изверженных пород. Трещинные воды известняков, песчаников, сланцев обычно имеют концентрацию радона в пределах 10-100 Бк/л. Чем ближе к поверхности земли, тем меньше концентрация растворенного радона. В грунтовых водах она обычно составляет менее 50 Бк/л, а в поверхностных - 2-5 Бк/л. Причина этого — переход радона (эманирование) в атмосферный воздух, а также его радиоактивный распад.

Из-за разности концентраций радона между почвенным воздухом и атмосферой происходит постоянный конвективный вынос радона в атмосферу. Концентрация радона в воздухе зависит прежде всего от геологической обстановки. Она выше в тех районах, где горные породы содержат повышенное количество радионуклидов — предшественников радона (радия, урана или тория). Особенно концентрации радона в

воздухе возрастают в районах вулканической деятельности. Активность радона в атмосферном воздухе над сушей в 3-5 раз выше, чем над океаном вблизи берегов и в десятки—сотни раз выше, чем над океаном вдали от берегов. В воздухе над поверхностью суши содержится в среднем около  $26 \text{ Бк/м}^3$   $^{222}\text{Rn}$ .

Скорость, с какой радон поступает в атмосферный воздух, зависит от ряда причин: концентрации радона в почвенном воздухе, температуры, давления, скорости движения воздушных масс, наличия и толщины снегового покрова, глубины промерзания почвы и пр. При снижении атмосферного давления скорость поступления радона в воздух возрастает, а во время дождя, при наличии снежного покрова, во время таяния снегов и образования льда, напротив, уменьшается. Отмечаются сезонные колебания: в зимний период эманация радона минимальна, а в летний — она достигает максимума. В ночное время суток скорость эманирования примерно в два раза выше, чем в полуденное.

Наибольшее количество радона содержится в приземном слое атмосферы. С увеличением высоты оно уменьшается, причем концентрация торона падает быстрее, чем радона  $^{222}\text{Rn}$ .



Рис.1.Схема районирования территории России по потенциальной радоноопасности.

Белым цветом обозначены районы потенциальной опасности по радону для населения. [13]

На территории России к районам потенциальной радоноопасности были отнесены районы с аномально высокими концентрациями радона (Рис.1) в выходах минерализованных вод и радия в подземных водах нефтеносных бассейнов, районы с повышенным уровнем содержания радия и урана в горных породах, а также области современных землетрясений и зоны активных тектонических разломов земной коры. Этими же факторами обусловлены аномально высокие концентрации радона в жилых и производственных помещениях [14].

### 3. Саблинские пещеры

Саблинские пещеры – это старинные горные выработки (возраст наиболее старых выработок – 160-170 лет) для добычи белого чистого кварцевого песка для стекольного производства. В геологическом разрезе палеозойских пород (Рис.2) этот песок представлен песками саблинской свиты. Выше по разрезу залегают пески тосненской свиты (мощность – 2-3 м), затем располагается маркирующий горизонт аргиллитов копорской свиты, (диктионемовые сланцы) мощностью 15–20 см. Далее следуют пески, глины, мергели лэзтесской свиты (50-70 см) и перекрывающие их известняки волховской свиты [15, 16].

СИСТЕМА	ОТДЕЛ	ЯРУС	ГОРИЗОНТ	СВИТА, (ПОДСВИТА)	КОЛОНКА	ИНДЕКС	МОЩНОСТЬ м.	ХАРАКТЕРИСТИКА ПОРОД						
Ордовикская	Средний	Лланвирнский	Кундаский	Обуховская		Q	>5	Суглинки с валунами кристаллических пород						
						O <sub>2</sub> ob	>2	Ортоцератитовые известняки с прослоями глин и алевроитов						
						O <sub>2</sub> vl	5,5	Нижний чечевичный слой						
								Пестроокрашенные доломитизированные известняки с глинисто-алевроитовыми прослоями. "Желтяки" и "Фризы"						
						O <sub>2</sub> lt	1,8	Толстоплитчатые доломитизированные известняки "Дикари"						
								Глауконитовые пески, глины и мергели						
						O <sub>2</sub> ts	2-3	Аргиллиты черного и серовато-черного цветов						
								Бурые оболочевые пески и песчаники (верхние оболочевые пески)						
						Кембрийская	Средний	Тискреский	Лэзтесская	Саблинская		E <sub>2</sub> sb	10-15	Серые оболочевые пески (средние оболочевые пески)
														Косослоистые оболочевые пески и песчаники (нижние оболочевые пески)
Косослоистые светлоокрашенные пески и песчаники с редкими линзами кварцитовидных песчаников														
Параллельно-слоистые серые песчаники														
Кембрийская	Нижний	Лонтовасский	Лонтовасская		E <sub>1</sub> ln	>6	Синие неслоистые глины							

Рис. 2. Стратиграфическая колонка нижнепалеозойских отложений окрестностей Саблино [16].

При проходке оставляли столбы-колонны в качестве естественной крепи, которые чередовались с камерами, где велась основная добыча. После выемки представляющих промышленный интерес песков саблинской свиты своды и стенки штолен и камер (сейчас их называют залами) стали обрушаться. В результате в свободном подземном пространстве во многих местах оказались обнаженными породы всех вышележащих свит. При этом потолок залов зачастую образован песками тосненской свиты, либо известняками волховской свиты. Разница в абсолютных отметках пола залов колеблется в пределах 5 метров. Дополнительные неровности уровня пола связаны с обрушением пород свода. Отсюда возникает весьма неровный рельеф пещеры с обвалами, навалами плит, узкими лазами и «шкуродерами». В плане наблюдаются пониженные участки пещер, заполненные водой подземных озер. Таким образом, некоторые проходы и залы понижены, а другие в результате навала обрушенных пород, наоборот, повышены. Поскольку входы в пещеры находятся на разных гипсометрических уровнях, то пол, потолок и стены ближайших к ним залов также сложены разными породами [1].

# Аппаратура и методика измерений

## 3.1 Описание радиометра

Радиометр РГА-02Т предназначен для измерения ОА радона и торона, а также ОА дочерних продуктов в воздухе помещений различного назначения, горных выработках (шахты, тоннели, бункеры и пр.), включая заглубленные сооружения, с целью оценки радиационной обстановки и соответствия требованиям нормам радиационной безопасности. Радиометры и методики измерений внесены в Государственные реестры измерения и методик измерения.

В комплект прибора входят: радиометр (пульт) и устройство отбора проб анализируемого воздуха типа ВПМ-10-12 с объёмным расходом воздуха через аналитический аэрозольный фильтр типа АФА-РСП-10 равным 10дм<sup>3</sup>/мин. (Рис.3)

Питание пульта и пробоотборного устройства осуществляется от автономных источников питания напряжением 12 В. Перед выполнением измерений проверяется состояние батарей (аккумуляторов) питания. При необходимости выполняется подзарядка или их замены.



Рис.3. Справа альфа-радиометр РГА-02Т, слева устройство отбора проб анализируемого воздуха типа ВПМ-10-12 с аналитическим аэрозольным фильтром типа АФА-РСП-10. (фотография В.О.Бунина)

Условия выполнения отбора проб воздуха.

Модель кинетики активности радионуклидов в сцинтиляторе. Многие радиоактивные ядра, претерпевая радиоактивный распад, образуют цепочки радиоактивных элементов. Одним из них является радон ( $^{222}\text{Rn}$ ), который, распадаясь, порождает целую плеяду радиоактивных элементов. Цепочка радона является составной частью более обширной цепочки распада  $^{238}\text{U}$ . Цепочку радона обычно обрывают на  $^{210}\text{Pb}$ , который имеет период полураспада 22 года и условно, в случае радона, считается «стабильным». Таким образом, цепочку радона образуют следующие элементы в следующем порядке (здесь опущены каналы распада с малой вероятностью):



Радиометр относится к сцинтиляционным приборам интегрального типа измерений с использованием временных интервалов и расчётов измеряемых величин с учётом постоянных времени распада дочерних продуктов радона [17].

### ***3.2 Отбор проб воздуха на аэрозольный фильтр***

Методики подразделяются по временным интервалам измерений проб воздуха, отобранных на аэрозольные фильтры. Подразделяются по количеству таких интервалов, времени затрат на каждое измерение, что связано с их качеством и погрешностью измерений. Название методик происходит от авторов разработки методов. Выделяют три группы методик:

-Одно измерение (Кузнец, Ролле и др.) – используют для измерений ОАР и торона;

-Два измерения (Марков и соавторы) – применяют для измерений ОАР, а также оценки ОА дочерних продуктов;

-Три измерения (Томас и модификации метода) – для измерений ОАР и ОА дочерних продуктов.

Далее рассматривается методика отбора проб воздуха на аэрозольный фильтр по Ролле.

3.2.1 По прибытию на каждую точку отбора необходимо измерить фон радиометра с пустым фильтром из неиспользованной упаковки, это измерение будет использоваться для вычисления объёмной активности радона в соответствующей точке отбора.

Для измерения фонового уровня нужно извлечь пустой аэрозольный фильтр из упаковки и установить его в счётное гнездо радиометрической установки РГА-02Т на 6 минут. Время контролируется с помощью секундомера.

3.2.2 По истечению времени аэрозольный фильтр извлекается из счётного гнезда и помещается в упаковку использованных фильтров, а значение фона записывается в полевой журнал.

3.2.3 После измерения фона проводится непосредственно измерение. Новый пустой аэрозольный фильтр извлекается из упаковки и закрепляется в фильтродержателе воздуходувки.

Во время измерения воздуходувка держится в руке или шее так, чтобы «выхлоп» воздуходувки был направлен в сторону противоположную направлению движения.

В обследуемом помещении отбор пробы воздуха производится в движении равномерно по всей площади помещения, но не ближе чем 0,5 м от стен, с объёмной скоростью 10 дм<sup>3</sup>/мин.

Время прокачки воздуха составляет 5 минут, контролируется секундомером, а скорость прокачки – с помощью встроенного в воздуходувку ротаметра.

Поплавок ротаметра должен быть в положении, когда его середина находится на уровне риска, соответствующей объёмному расходу воздуха, указанному в свидетельстве о проверке РГА-02Т. При необходимости ручкой регулировки расхода выставляется поплавок ротаметра в нужное положение периодически контролируется при отборе пробы воздуха.

- 3.2.4 После продувки аэрозольный фильтр аккуратно перемещается в счётное гнездо радиометра. Измерение экспонированного фильтра выполняется через 6 минут после отбора пробы в течение 6 минут. Режим необходимо строго выдерживать с помощью секундомера.
- 3.2.5 Показание радиометра (количество импульсов, зарегистрированных за 6 минут) заносится в полевой журнал (рис. 4) [17].



Рис.4. Проведение измерений ОАР в подземном пространстве Саблинских пещер (фотография В.О.Булнина)

Также на каждой точке отбора пробы проводились измерения температуры и влажности воздуха с помощью переносной метеостанции МЭС-200, предназначенной для измерения атмосферного давления, относительной влажности воздуха, температуры воздуха. (Рис.5)



Рис.5. Проведение измерения температуры и влажности воздуха (фотография В.О.Бунина)

МЭС-200 состоит из блока электроники и сменных измерительных щупов. Разновидности измеряемых параметров приведены в таблице 1.

Таблица 1. Изменяемые параметры метеостанции МЭС-200

Изменяемые параметры	Диапазон измерений	Предел допускаемой основной погрешности	
		абсолютная $\Delta_0$	относительная $\delta_0$
давление	от 80 до 110 кПа	$\pm 0,3$ кПа ( $\pm 2,3$ мм.рт.ст.) при температуре от 0 до 60 °С; $\pm 1,0$ кПа ( $\pm 7,6$ мм.рт.ст.) при температуре от минус 20 до 0°С	-
относительная влажность	от 10 до 98 %	$\pm 3,0$ % при температуре (25 $\pm$ 5) °С	-
температура	от минус 40 до 85°С	$\pm 0,2$ °С в диапазоне от минус 10 до 50 °С; $\pm 0,5$ °С в диапазоне от минус 40 до минус 10°С и от 50 до 85 °С;	-

### 3.3 Техника измерений с РГА-02Т по методу Ролле

#### 1. Перед первым измерением:

- достать аналитический аэрозольный фильтр (далее Фильтр) из пачки I с чистыми фильтрами,
- вставить фильтр в счетное гнездо пульта радиометра РГА-02Т (далее Пульт),
- провести измерение фона в течение 6 мин.

#### 2. На точке измерения:

- извлечь фильтр из счетного гнезда Пульта при первом измерении после определения фона или,
- извлечь фильтр из пачки I с чистыми фильтрами
- вставить в Устройство отбора проб анализируемого воздуха (далее Воздуходувка),
- запустить Воздуходувку на 5 минут,
- установить поплавков ротаметра так, чтобы его середина находилась на уровне красной риски,

- при отборе проб перемещать прибор по всей площади пространства, но не ближе, чем 0,3 м от стен,
- после прокачки воздуха отключить Воздуходувку и вставить фильтр в счетное гнездо Пульта,
- подождать 6 минут после отключения Воздуходувки,
- запустить процесс измерения пробы на 6 минут.
- записать отсчет в журнал наблюдений,
- вынуть фильтр из счетного гнезда и поместить его в пачку использованных фильтров. Соблюдать порядок размещения фильтров в соответствии с порядком точек опробования.

Таким образом схема измерений на точке (без фона): 5 мин – прокачка, 6 мин – перерыв, 6 мин – измерение. (рис.6)



Рис.6. Отбор пробы в ТО №4, пещера Псевдо Санта-Мария (фотография В.О.Бунина)

### 3.4 Обработка результатов измерений

Рассчитываем объёмную активность  $^{222}\text{Rn}$  в воздухе по методу Ролле при неизвестном коэффициенте сдвига радиоактивного равновесия  $^{222}\text{Rn}$  и его дочерних продуктов распада по формуле

$$\text{OAP} = 0,602 * [N_p - N_{\text{фр}}] / v * \vartheta * \eta_{\text{рга}}$$

Где OAP – объёмная активность  $^{222}\text{Rn}$  в воздухе, Бк/м<sup>3</sup>;  $N_p$  – количество импульсов, зарегистрированных радиометром при измерении экспонированного фильтра в течение 6 минут спустя 6 минут после окончания отбора пробы воздуха;  $N_{\text{фр}}$  – количество фоновых импульсов, зарегистрированных в течение 6 минут; 0,602 – коэффициент пропорциональности, с<sup>-1</sup>\*дм<sup>3</sup>\*м<sup>-3</sup>\*мин<sup>-1</sup>;  $v$  – эффективность улавливания фильтром аэрозолей, равна 0,9;  $\eta_{\text{рга}}$  – чувствительность радиометра, приведённая в свидетельстве о проверке, с<sup>-1</sup>\*Бк<sup>-1</sup>;  $\vartheta$  – объёмный расход воздуха, приведённый в свидетельстве о проверке, дм<sup>3</sup>/мин.

Диапазоны измерений объёмной активности  $^{222}\text{Rn}$  и приписанные погрешности результатов измерений при неизвестном коэффициенте сдвига радиоактивного равновесия  $^{222}\text{Rn}$  и его дочерних продуктов распада приведены в таблице 2 [17].

Таблица 2. Диапазоны измерений объёмной активности  $^{222}\text{Rn}$  и приписанные погрешности результатов

Объем воздуха, прокачиваемый через фильтр, дм <sup>3</sup>	Время отбора пробы воздуха, мин	Диапазон измерения эквивалентной равновесной объёмной активности радона-222, (ЭРОА <sub>Rn</sub> ) Бк/м <sup>3</sup>	Приписанная погрешность результата измерения (P=0,95), %
50	5	от 4 до 6	50
		от 6 до 10	40
		от 10 до 25	30
		от 25 до 100	20
		от 100 до 10 <sup>5</sup>	15

## 4. Результаты исследований

### 4.1 Величина и вариации объёмной активности радона

Объектами проведения определений ОАР являлись как внутренние залы пещер, населённые в основном летучими мышами (рис.7), так и пространство залов вблизи от выходов на дневную поверхность. Именно здесь наблюдается наибольшее количество и разнообразие зимних обитателей пещер: среди них чешуекрылые (совки, пяденицы), самки кровососущих комаров, лимонииды, ихневмонида, другие членистоногие, некоторые амфибии (жабы, тритоны). Результаты изучения их выживаемости и биохимических характеристик в ходе зимовки могут дать ответ на некоторые вопросы влияния естественной радиоактивности на физиологическое состояние этих животных [18, 19].



Рис.7. Семейство летучих мышей в внутренних залах пещер (фотография В.О.Бунина)

В подземных горных выработках с естественной (не искусственной) вентиляцией держится постоянная температура и уровень влажности. В то же время, выбор в качестве объекта «радоновых» исследований воздуха пещер не исключает влияние таких факторов, как внутренняя микроциркуляция воздуха, горизонтальная и вертикальная конфигурация подземного пространства, тектоническая активность местности, структурно-текстурные особенности и состав горных пород [1].

Максимальной радиоактивностью (до 80-120 мкР/ч) отличаются аргиллиты (диктионемовые сланцы), в которых регистрируемый уровень мощности экспозиционной дозы превышает фоновый более чем в десять раз. В радиометрии такие значения радиоактивности пород считаются аномальными. По результатам измерений

проб, отобранных ранее на обнажениях «Придорожный карьер» и «Саблинский водопад», проведённых ранее, уровень удельной эффективной активности аргиллитов имеет высокое значение от 1200 до 3000 Бк/кг. Пересчет на массовые доли содержания урана показал, что в среднем концентрация урана в аргиллитах находится на уровне 105 -130 г/т. Поэтому места выхода этих пород на контакте со свободным воздушным пространством представляют определенную радиэкологическую опасность, прежде всего за счет эманиции радона из уран-содержащих минералов [3].

По результатам проведённых измерений в период с 07.12.2019 по 06.03.2020 уровня объёмной активности радона во внутренних и привходовых залах Саблинских пещер Жемчужная, Псевдо Санта-Мария, Штаны, величина ОАР варьируется от 10 до 19900 Бк/м<sup>3</sup>.

Измерения проводились в 10 точках опробования в разных залах пещер. Суммарное количество определений ОАР – 29, значения которых представлены в табл. 3, а места точек опробования показаны на рис. 8. Данные по измерению температуры и влажности воздуха в каждой точке опробования приведены в табл. 4.

Таблица 3. Результаты измерения ОАР в Саблинских пещерах \*)

№ ТО	Окружающие породы	ОАР Бк/м <sup>3</sup>					
		07.12.2019	21.12.2019	18.01.2020	24.01.2020	18.02.2020	06.03.2020
1	<sup>a</sup> СП+ТП	19	67	76		8	26
2	СП+ТП+А +ПГМЛ+И	683	782			195	
3	<sup>a</sup> СП						53
4	<sup>a</sup> СП	201	170			784	
5	<sup>a</sup> СП+ТП	77	34				
6	<sup>a</sup> СП+ТП			1864	6742	3924	5006
7	<sup>a</sup> СП+ТП			700	3404		3107
8	<sup>a</sup> СП+ТП			2973	7956		
9	ТП+А+ПГМЛ+И		13365			2036	6835
10	ТП+А+ПГМЛ+И			14357	11625		19931

\*) Обозначения в таблице: СП – саблинские пески, ТП – тосненские пески, А – аргиллиты в стенках залов или штолен, ПГМЛ – пески, глины, мергели леэтсеской свиты, И – известняки волховской свиты. Верхним индексом «а» отмечены залы и штольни, в которых могут присутствовать небольшие количества обломков аргиллитов в обвальных нишах.

На рисунке 9 показан фрагмент схемы горных выработок системы пещер «Жемчужная – Штаны». Цифрами на карте обозначены номера точек определения ОАР в период с декабря 2019 по март 2020 г. Точки наблюдения 1-7 расположены на расстоянии менее 30 м от входа, точка 8 удалена от входа на 50 м, а точки наблюдения 9, 10 расположены во внутренних залах пещер на расстоянии более 80 м от входов. Черными кружками в привходовых частях обозначены места зимовки комаров.

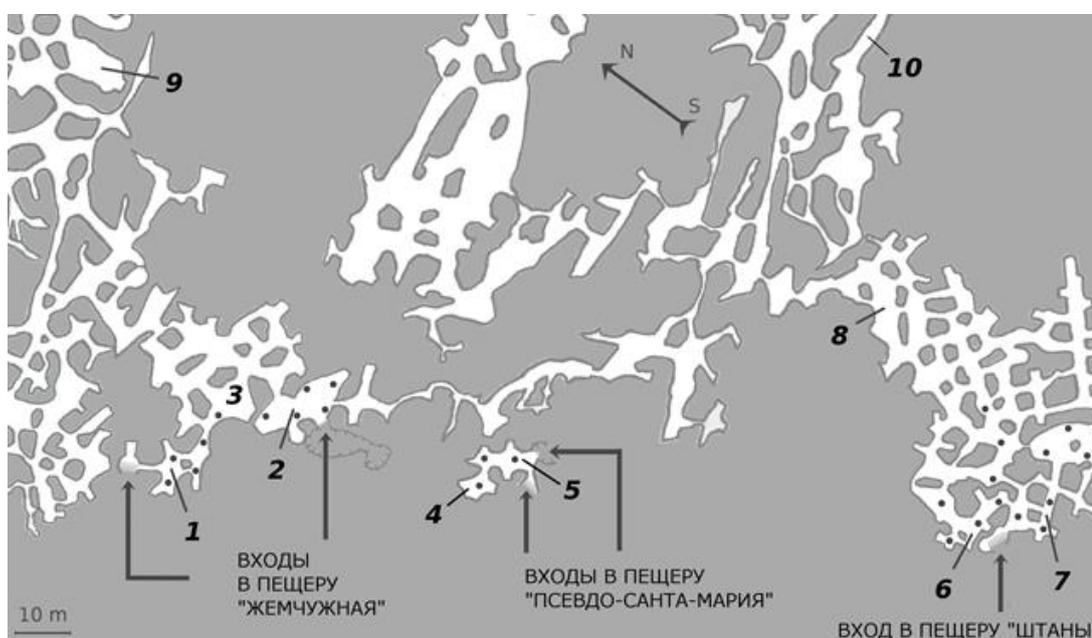


Рис.8. Фрагмент схемы горных выработок системы пещер «Жемчужная – Штаны». Схема составлена на основе топольеомок С. Малахова и др. (2003 г.), К.Е. Васюкевича и др. (2009–2011 г.) и карты из архива Ю.С. Ляхницкого [16]; уточнения внесены А.В. Разыграевым и В.В. Гордеевым, май 2019 г. Обозначения в тексте.

Точка 1 представляет собой хорошо продуваемую камеру, расположенную непосредственно при основном входе в пещеру «Жемчужная». В камере по сторонам от входного отверстия расположены обвальные ниши, в которых в большом количестве скапливаются зимующие комары. Основная окружающая порода — песчаник саблинской и тосненской свит. Узкий переход, проходящий мимо обвального конуса, ведет в просторный зал среди песчаника саблинской свиты, в котором расположена измерительная точка 3. Точка 3 также частично окружена обвальными участками. Точка 2 – просторный зал, в восточной части которого обнажены свиты от верхней саблинской

до нижней волховской. Зал в настоящее время имеет небольшой выход в провал. По всем стенам зала без исключения присутствуют выходы аргиллитов. Мощность экспозиционной дозы в воздухе непосредственно около этих пород равна 40-50 мкР/ч (редко выше 100 мкР/ч). Точки 4 и 5 – пещера «Псевдо-Санта-Мария» – ранее это была привходовая часть пещеры «Жемчужная», отрезанная обвалами после 1970 г. [20]. Один из входов в пещеру проходит через пески тосненской свиты, второй – обвальным спуском в пещеру через известняки, глины и слой аргиллитов, соответственно, волховской, лезтсеской и копроской свит. В глубине пещеры (точка 4) – саблинские пески. Точки 6 и 7 – привходовые части пещеры «Штаны», проходящие через саблинские и тосненские пески. Прямые выходы аргиллитов отсутствуют, но есть обвальные участки, отделяющие штольни от дневной поверхности. Для точек 4-7 характерна высокая концентрация диапаузирующих комаров в зимнее время. Точка 8 – просторный зал, центральная часть которого расположена в 50 м от входа в пещеру «Штаны». Стенки и свод составлены песками саблинской и тосненской свит. В зале хорошо заметна между ними прослойка песков ладожской свиты. В боковой части имеются обвальные конусы с обломками аргиллитов и известняков. В стенах самого зала аргиллиты отсутствуют. Из насекомых встречаются единичные лимониды. Точка 9 – в предыдущих работах фигурирует под названием «Зал с летучими мышами» [2,3], расположена в глубине пещеры «Жемчужная». Посередине зала большой обвальным конус, в стенках присутствуют выходы аргиллитов, потолок представлен известняками волховской свиты. Насекомые отсутствуют, характерно большое количество летучих мышей (6 марта 2020 г. в нем насчитана 41 летучая мышь). Точка 10 – начальный участок протяженного перехода в глубину системы «Штаны». Окружающие породы – в основном красные пески тосненской свиты, при продвижении вглубь и вверх зал переходит в лаз с выходами аргиллитов и известняков. Зимующие насекомые отсутствуют, летучие мыши немногочисленны.

Как видно из табл. 3, ОАР варьируются в широких пределах. Значения ОАР в привходовых и расположенных в глубине залах различны. Также ОАР зависит от состава пород, которыми сложены потолок, стены и пол залов. Очень вероятно совместное влияние двух факторов — удаленность от выходов и состав пород. Наибольшие значения наблюдались в дальних залах, где присутствуют выходы диктионемовых сланцев. Наименьшие значения зарегистрированы в тех привходовых частях, где пол, потолок и стены ниш или залов представлены кварцевыми песками саблинской и нижней тосненской свит.

Приведенные закономерности подтверждаются при использовании регрессионной модели двухфакторного дисперсионного анализа (с использованием в качестве исходных значений натуральных логарифмов ОАР): для фактора «наличие/отсутствие выходов аргиллитов» р-значение составило 0,0067, а для фактора «удаленность от выходов» (с использованием переменных «до 30 м», «50 м» и «более 80 м») р-значение составило 0,019. Таким образом, по двум факторам различия по ОАР статистически значимы (т.к. р-значение явно меньше 0,05).

На рисунке 11 результаты измерений ОАР представлены в графической форме, некоторые из них сгруппированы по сходному составу пород (см. табл. 3) и по расположению в системе пещер. С учетом статистической значимости различий (табл. 5) и расположения залов, все результаты далее можно объединить в 3 основные группы.

Таблица 4. Результаты измерения температуры и влажности воздуха.

№ ТО	Окружающие породы	Температура / Влажность (°С / %)					
		07.12.2019	21.12.2019	18.01.2020	24.01.2020	18.02.2020	06.06.2020
1	<sup>a</sup> СП+ТП	5,3 / 67	5,6 / 78	3,4 / 83		-	3,8 / 78
2	СП+ТП+А +ПГМЛ+И	6,5 / 95	6,8 / 96			6,0 / 76	
3	<sup>a</sup> СП						6,5 / 77
4	<sup>a</sup> СП	6,8 / 82	5,9 / 88			5,0 / 78	
5	<sup>a</sup> СП+ТП	5,1 / 84	4,6 / 83				
6	<sup>a</sup> СП+ТП			6,7 / 75	6,9 / 76	6,8 / 79	6,0 / 81
7	<sup>a</sup> СП+ТП			6,4 / 72	6,0 / 88		4,0 / 83
8	<sup>a</sup> СП+ТП			8,0 / 80	6,7 / 90		
9	ТП+А+ПГМЛ+И		8,9 / 94			-	7,9 / 87
10	ТП+А+ПГМЛ+И			8,6 / 80	8,6 / 92		8,0 / 84

Большие значения наблюдались в тех залах, где диктионемовые сланцы, являясь источником радона, контактируют непосредственно с воздушным пространством (рис.9). Наименьшие значения зарегистрированы там, где пол, потолок и стены ниш или залов представлены чистыми кварцевыми песками саблинской свиты (рис.10).



Рис. 9. Точка опробования №10, Красный туалет (фотография В.О.Бунина)

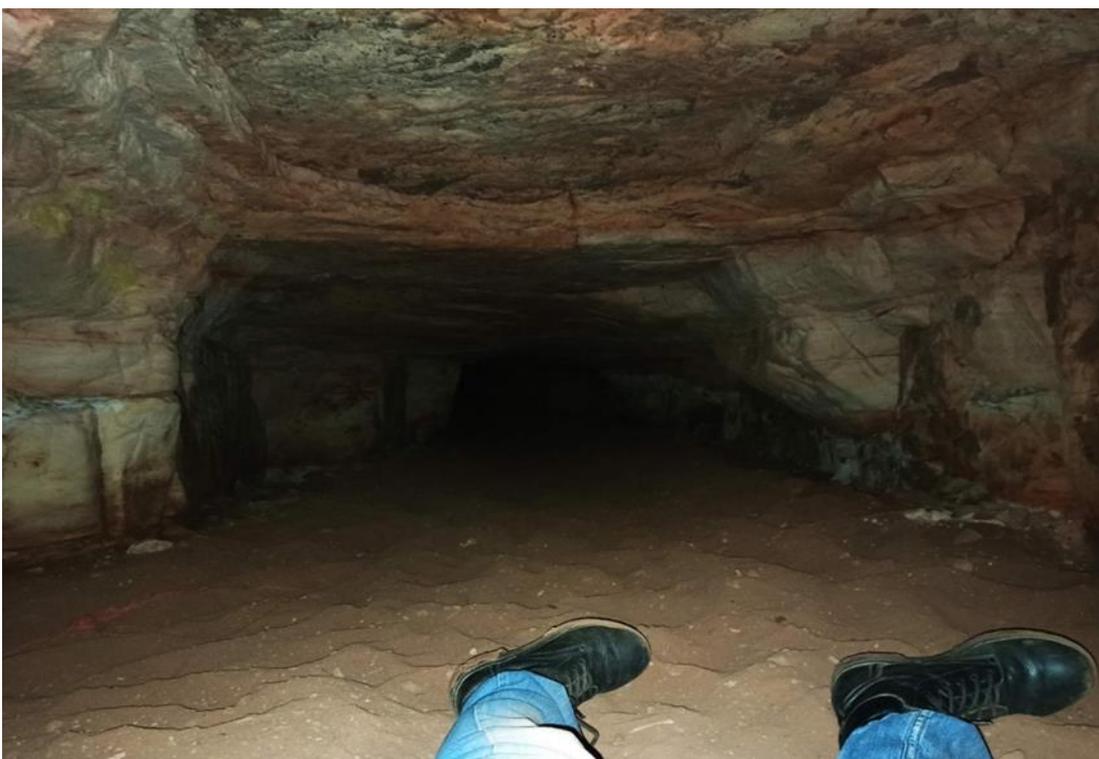


Рис. 10. Точка опробования №7 (фотография В.О.Бунина)

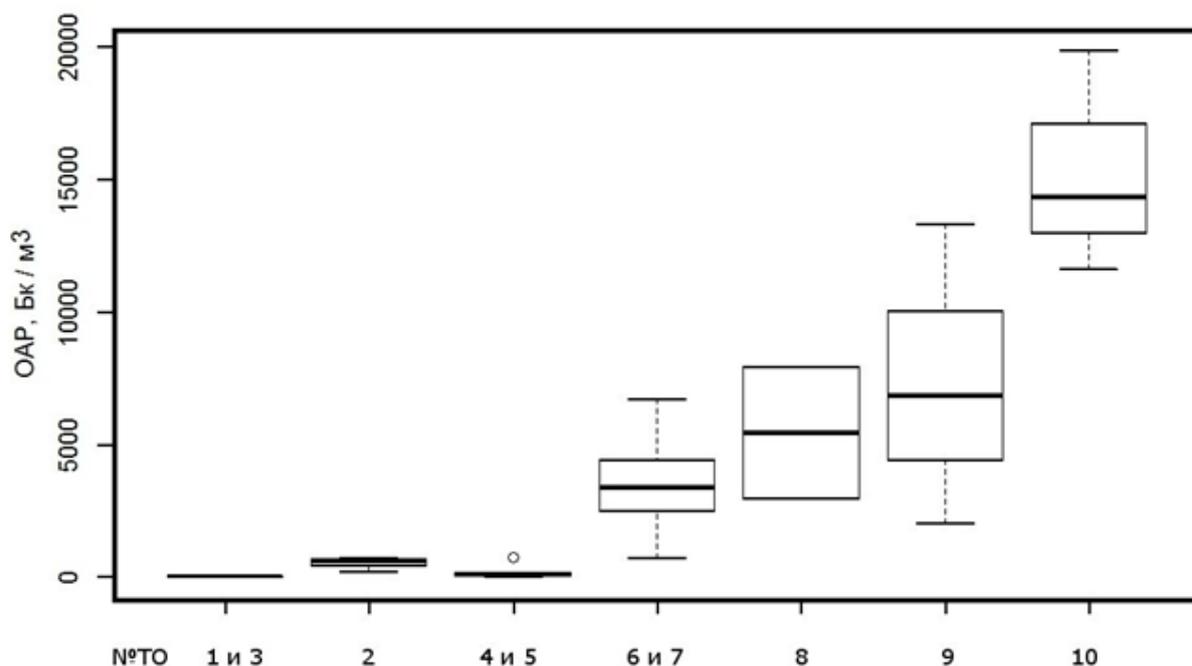


Рис.11. Величины ОАР в привходовых и глубинных частях пещер «Жемчужная», «Псевдо-Санта-Мария» и «Штаны». Обозначения: жирная линия внутри бокса – медиана, нижняя и верхняя границы – 1-й и 3-й квартили, «усы» – размах min-max, кружок – выброс.

Таблица 5. Р-значения, полученные в статистических сравнениях точек опробования (ТО) по ОАР, выполненных по критерию Манна-Уитни-Уилкоксона с поправкой Бенджамини-Хохберга

	ТО 1 и 3	ТО 2	ТО 6 и 7
ТО 2	0,0476		
ТО 4 и 5	0,0476	0,436	0,025
ТО 6 и 7	0,01166	0,0476	
ТО 8			0,6667
ТО 9	0,0476	0,125	
ТО 10			0,01667

Примечание: при  $p < 0,05$  различия между ТО статистически значимы

В точках опробования 1–5, которые относятся к привходовым, ОАР варьируется от 8 до 784 Бк/м<sup>3</sup> при среднем значении 225 Бк/м<sup>3</sup>. В точках опробования 6, 7, которые также относятся к привходовым, ОАР варьируется от 700 до 6742 Бк/м<sup>3</sup> в среднем составив 3535 Бк/м<sup>3</sup>. В точках опробования 8-10, которые относятся к дальним залам, значение ОАР варьируется от 2036 до 19931 Бк/м<sup>3</sup> в среднем составив 9885 Бк/м<sup>3</sup>.

Из рис. 8 видно, что самки кровососущих комаров проникают внутрь пещер на расстояние менее 50 м от выходов. Поэтому для оценки влияния на них естественной радиоактивности только первые две группы данных (со средними значениями 225 Бк/м<sup>3</sup> и 3535 Бк/м<sup>3</sup>) представляют интерес для выбора мест сбора комаров в основную и контрольную группы. Оптимальным вариантом для контрольной группы является группа залов с точками опробования 1 и 3, имеющая наиболее низкие и относительно стабильные значения ОАР. Оптимальным вариантом для основной группы является группа залов с точками опробования 6, 7 (несмотря на отсутствие выходов аргиллитов), имеющая высокие значения ОАР, которые за весь период измерений не перекрывались со значениями ОАР в точках 1 и 3 ( $p = 0,01166$ , табл. 5). Залы с точками опробования 2 (с выходами аргиллитов), и 4, 5 (без явных выходов аргиллитов) представляют меньший интерес ввиду высокой вариабельности значений ОАР в течение холодного периода года; эти части пещер даже не имеют между собой и намека на присутствие значимых различий ( $p = 0,436$ , табл. 5). [21].

#### **4.2 Оценка влияния радона на биологические объекты на примере комаров вида *Culiseta annulata***

В двух выборках самок кровососущих комаров *Culiseta annulata* (Schrank, 1776), перезимовавших при сильно различающихся концентрациях радона в Саблинских пещерах (Тосненский р-н, Ленинградская обл.), измерен индекс массы тела (Рис. 13). Отбор комаров производился 22 марта 2020 года до окончания холодного периода в двух частях системы пещер со сравнительно стабильной ОАР. В выборку из привходового зала пещеры Жемчужная (ТО №1) вошло 15 самок, а в выборку из привходовой части пещеры Штаны (ТО №7) вошло всего 9 самок. Вид комаров - *Culiseta annulata* (Рис.14) хорошо отличаются от всех остальных комаров, которые зимуют в пещерах, и при этом встречаются там в немалом количестве. Отличительными признаками этих комаров являются наличие предвершинных светлых колец на бёдрах и срединных светлых колец на первых члениках лапок, т.е. этих комаров не приходится собирать вслепую, а потом определять вид в лаборатории (как, например, в случае *Culex pipiens* или *Culex torrentium*). То есть выбор *Culiseta annulata* обусловлен тем, что с ними удобнее работать прямо на этапе сбора в пещере. [4].

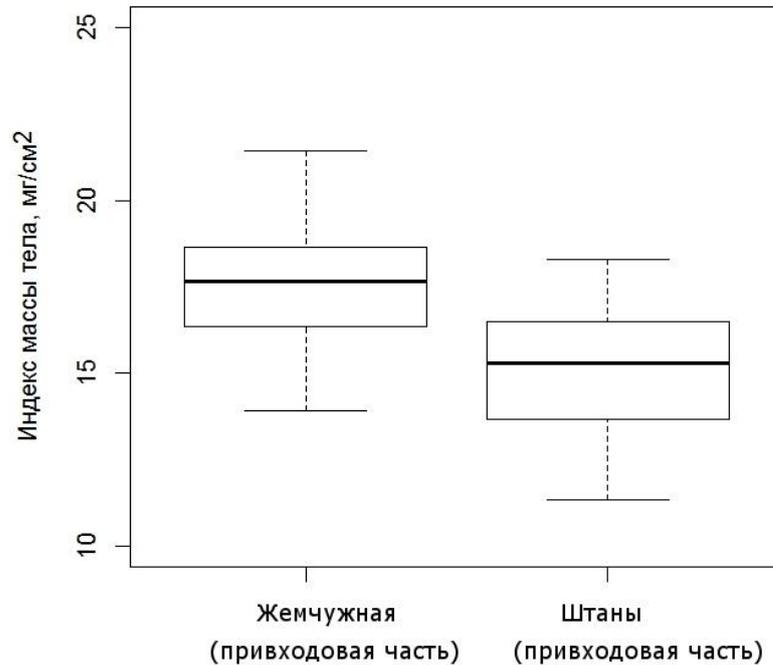


Рис. 13. Индекс массы тела комаров вида *Culiseta annulata* в привходовых частях Саблинских пещер

Индекс массы тела оценивали как массу относительно длины тела, возведенной в квадрат (в  $\text{мг}/\text{см}^2$ ). Индекс предложен А.В.Разыграевым для оценки жировых запасов у зимующих комаров по аналогии с индексом массы тела, используемым в медицине при оценке степени накопления жира у человека (индекс Кетле). В части системы пещер с ОАР, равной в среднем  $39 \text{ Бк}/\text{м}^3$  (медиана – 26, min–max – 8-76), индекс массы тела самок составил в среднем  $17.51 \text{ мг}/\text{см}^2$  (медиана – 17.64, min–max – 13.90-21.43), а при ОАР, равной в среднем  $2404 \text{ Бк}/\text{м}^3$  (медиана – 3107, min–max – 700-3404), индекс составил в среднем  $15.15 \text{ мг}/\text{см}^2$  (медиана – 15.28, min–max – 11.33-18.30); различие по индексу массы тела статистически значимо ( $p = 0.0115$ , t-тест Стьюдента). Для тех же участков пещер получены почти идентичные средние и медианные значения влажности воздуха, а температура при сопоставлении медиан была ниже на  $1.4 \text{ }^\circ\text{C}$  в пещере с низкой ОАР. Можно предположить, что высокая концентрация радиоактивного газа усиливает стресс во время зимовки, и это сопровождается более интенсивным расходом запасённых питательных веществ. Другим объяснением различий в массе тела может быть незначительная разница в температуре воздуха, при более высоких значениях которой возрастает скорость метаболизма у зимующих комаров.



Рис.14. *Culiseta annulata* с обозначением длины тела, использующейся в расчёте индекса массы тела (фотография А.В.Разыграева)

## Заключение

По результатам выполненных исследований можно сделать следующие выводы:

1. В ходе полевых работ выполнены измерения ОАР в подземном пространстве Саблинских пещер Жемчужная, Псевдо Санта-Мария, Штаны (Тосненский район, Ленинградская область). Всего произведено 29 измерений ОАР в глубинных залах и вблизи от дневной поверхности, а также выполнены измерения температуры и влажности воздуха.
2. Большие значения наблюдались в тех залах, где диктионемовые сланцы, являясь источником радона, контактируют непосредственно с воздушным пространством. Наименьшие значения зарегистрированы там, где пол, потолок и стены ниш или залов представлены чистыми кварцевыми песками саблинской свиты.
3. Отобрано 24 биологических объектов (*Culiseta annulata*) в привходовых залах пещер со стабильными значениями ОАР. Из них 15 особей отобраны в ТО №1 с низкими значениями ОАР, а 9 особей отобраны в ТО №7 с относительно высокими значениями ОАР.
4. В результате анализа индекса массы тела основной и контрольной группы биологических объектов на примере комаров вида *Culiseta annulata*, зимовавших в привходовых залах пещер с сильно различающимися значениями ОАР, можно обоснованно предполагать, что высокая концентрация радиоактивного газа усиливает стресс во время зимовки, и это сопровождается более интенсивным расходом запасённых питательных веществ.

## Список литературы

- [1] *Иванов М.И., Лебедев С.В., Нестеров Е.М.* Величина и вариации активности радона в воздухе подземного пространства. Проблемы региональной экологии. №5, 2012. С. 101-105.
- [2] *Лебедев С. В., Гребенников Г. Г.* Объемная активность радона в воздухе пещеры «Жемчужная» (Саблино, Ленинградская обл.). Геология, геоэкология, эволюционная география. Т. X: Сб. научн. тр./под ред. Е.М. Нестерова. – СПб.: Изд-во РГПУ им. А.И. Герцена, 2010. с. 34–37.
- [3] *Лебедев С.В., Разыграев А.В., Череватов Н.В.* Активность радона в привходовых частях Саблинских пещер. Науки о Земле и цивилизация. Коллективная монография. Том. XI / Под ред. Е. М. Нестерова, В. А. Снытко. – СПб.: Из-во РГПУ им. А. И. Герцена, 2019. – с. 117–121.
- [4] *А.В.Разыграев.* Различие в распределении зимующих самок кровососущих комаров из родов *Culex* и *Culiseta* (Diptera, Culicidae) в привходовых частях пещер: связь с разными требованиями к температуре и влажности воздуха. Паразитология, 2021, том 55, №1, с. 48-62.
- [5] *Allegrucci G, Sbordoni V, Cesaroni D* (2015) Is Radon Emission in Caves Causing Deletions in Satellite DNA Sequences of CaveDwelling Crickets. PLoS ONE 10(3): e0122456. doi: 10.1371/journal.pone.0122456.
- [6] *Уфимцева М.Д., Терехина Н.В.* Фитоиндикация экологического состояния урбогеосистем Санкт-Петербурга. – СПб.: Наука, 2005.
- [7] *Даринский А.В.*, География Ленинграда. – Л., Лениздат, 1982. – 190 с.
- [8] *Даринский А.В.*, География Ленинградской области. Учеб. Пособ. – СПб.: Свет, 1999.-135 с.
- [9] *В.А. Селиванова, В.С. Кофман.* Геология СССР. Том 1. Ленинградская, Псковская и Новгородская области. Геологическое описание. Северо-Западное территориальное ГУ. «Недра» М., 1971 г. Стр. 504.
- [10] Сайт палеонтолого-стратиграфического музея кафедры осадочной геологии Санкт-Петербургского государственного университета.  
[http://paleostratmuseum.ru/stud\\_coll\\_balt\\_geol\\_edu\\_1.html](http://paleostratmuseum.ru/stud_coll_balt_geol_edu_1.html)
- [11] *Кузнецов С.С.* Геологическое прошлое Ленинграда и его окрестностей. Л., 1955.
- [12] *Копейкин В.А.* Геохимия элементов: учеб. Пособие. Ухта: УГТУ, 2012. – 194 с.

- [13] Интернет ресурс сайт «Геохимия и биогеохимия – Биогеохимия радионуклидов», [https://studref.com/315218/ekologiya/geohimiya\\_biogeohimiya](https://studref.com/315218/ekologiya/geohimiya_biogeohimiya)
- [14] *Чертко Н.К., Чертко Э.Н.* Геохимия и экология химических элементов: Справочное пособие. Мн.: Издательский центр БГУ, 2008. – с. 140.
- [15] *Потравнов А.Л., Хмельник Т.Ю.* Из истории Саблинских пещер. Спелеология и спелестология. 2013. №4. С.231-238.
- [16] *Лебедев С.В.* Радиоактивность осадочных пород и экологическая обстановка на территории Саблинского памятника природы. Вестн. С.-Петерб. ун-та. Сер. 7. 2012. Вып. 2. С. 22-32.
- [17] *Шкрабо И. В.*, Учебное пособие по применению альфа-радиометра РГА-02Т для измерения ОАР  $^{222}\text{Rn}$ , 10.07.2019 г.
- [18] *Муханов А.В., Капралов С.А.* Фауна чешуекрылых (Lepidoptera) пещер Европейской части России. Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского, 2010, № 2 (2), с. 439–441.
- [19] *Разыграев А.В., Шулешко Т.М.* Использование фактора Байеса для определения видов *Culex pipiens* и *Culex torrentium* (Diptera: Culicidae) по морфометрическим характеристикам крыла. Паразитология. 2018. Т.52, №4. С.304-314.
- [20] *Малахов С., Шестакова К., Козлов А., Слепнева Т.Н.* 2010. Саблино. Карты Саблинских пещер. [Электронный ресурс]. <http://www.sablino.ru/cave/cavenav.htm> (дата обращения – 15 апреля 2019 г.)
- [21] *Лебедев С.В., Разыграев А.В., Бунин В.О., Каменкова С.Г., Череватов Н.В.* Об активности радона в подземном пространстве Саблинских пещер. Коллективная монография. Том XIX / Под ред. Е.М. Нестерова, В.А. Снытко. – СПб.: Издво РГПУ им. А.И. Герцена, 2020. С. 119 -127.

## **Благодарности**

Выражаю благодарность кандидату биологических наук, старшему научному сотруднику лаборатории по изучению паразитических членистоногих Зоологического института РАН Алексею Вячеславовичу Разыграеву за организаторскую деятельность и помощь во время проведения исследований, а также студентке 4 курса кафедры экологической геологии Светлане Каменковой за помощь и поддержку во время проведения полевых работ.

Выражаю признательность моему научному руководителю Оксане Святославовне Изосимовой за помощь и поддержку во время написания дипломной работы.

А также хочу выразить особую признательность и огромную благодарность скончавшемуся 7 января 2021 года кандидату геолого-минералогических наук доценту кафедры экологической геологии Сергею Васильевичу Лебедеву за бесценный опыт, переданный мне в процессе научных исследований, чуткое руководство на протяжении моего обучения на кафедре экологической геологии.