



НОВ БЪЛГАРСКИ УНИВЕРСИТЕТ

Департамент Информатика

Бакалавърка програма Информатика

**Автоматизиран биоинформатичен анализ
на генетични варианти, свързани със
стареенето**

Дипломна работа на
Михаил М. Здравков

Научни ръководители:

доц. д-р Милена Георгиева
маг. Момчил Топалов

Дипломен консултант:

гл. ас. д-р Методи Трайков

София 2022

Съдържание

1	Увод	7
2	Литературен обзор	9
2.1	Значение на стареенето	9
2.1.1	Дефиниция	9
2.1.2	Физиологични ефекти	9
2.1.3	Демографски и икономически ефекти	10
2.2	Молекулярно-биологични основи на живата материя	11
2.3	Молекулярно-биологични характеристики на стареенето	14
2.3.1	Натрупване на геномни изменения	15
2.3.2	Съкращаване на теломерите	15
2.3.3	Клетъчно стареене	16
2.3.4	Епигенетични изменения	16
2.3.5	Загуба на протеостаза	17
2.3.6	Нарушена клетъчна сигнализация	17
2.3.7	Митохондриална дисфункция	18
2.3.8	Изчерпване на резервоара на стволови клетки	18
2.3.9	Промени в междуклетъчната комуникация	18
2.4	Генетични фактори, влияещи на процеса на стареене	18
2.4.1	Видове генетични варианти	19
2.5	Биоинформатика	21
2.6	Значение на биоинформатиката за изследването на стареенето	22
2.7	Обзор на съществуващи биоинформатични решения	22
2.7.1	VCF файлове	22
2.7.2	Анотация на генетични варианти	23
2.7.3	Филтриране и анализ на генетични варианти	25
2.7.4	Геномни браузъри	26
2.7.5	Биоинформатични решения за определяне на 3D пространствена структура на протеини	28
2.7.6	Интегрирани софтуерни решения	31
2.8	Обобщение	31

3	Цели и задачи	33
3.1	Цел на дипломната работа	33
3.2	Задачи	33
4	Материали и методи	35
4.1	Използвани софтуерни решения	35
4.1.1	Flask	35
4.1.2	DuckDB	36
4.1.3	Pandas	36
4.1.4	PyVCF3	37
4.1.5	Samtools и Tabix	37
4.1.6	Pysam	37
4.1.7	HGVS	38
4.1.8	Bulma	38
4.1.9	IGV	39
4.1.10	AlphaFold2	39
4.2	Използвани и интегрирани генетични бази данни	39
4.2.1	HGNC	39
4.2.2	Ensembl	40
4.2.3	NextProt	40
4.2.4	HAGR	41
5	Резултати	43
5.1	Софтуерна архитектура	44
5.2	База данни	45
5.3	Управление на генни множества	47
5.4	Обработка на VCF при импортиране	47
5.5	Операции върху импортиран VCF	50
5.5.1	Списък на файлове	50
5.5.2	Обзор на файл	50
5.5.3	Обзор на ген	50
5.5.4	Варианти на ген	51
5.5.5	Засегнати транскрипти	51
5.5.6	Нагъване на протеини	52
6	Дискусия	53
7	Изводи	57
	Библиография	59
	Приложение	73

Използвани съкращения

API - Application Programming Interface - Приложен програмен интерфейс.

BAM - Binary Alignment Map - Бинарна карта на подравняване.

BCF - Бинарна версия на VCF.

CSS - Cascading Style Sheets - Език за стилизиране на страници.

GWAS - Genome-Wide Association Studies - Асоциативни изследвания върху целия геном.

HAGR - Human Aging Genomic Resources - Геномни ресурси за човешкото стареене.

HGVS - Human Genome Variation Society.

HTML - HyperText Markup Language - Език за маркиране на хипертекст.

HTTP - HyperText Transfer Protocol - Протокол за пренос на хипертекст.

IGV - Integrative Genomics Viewer - Интегрируема геномна програма за визуализация.

Indel - Insertion/Deletion.

MNP - Multiple Nucleotide Polymorphism.

NCBI - National Center for Biotechnology Information - Национален център по биотехнологична информация.

NGS - Next-Generation Sequencing - Технологии за секвениране от ново поколение.

OLAP - Online Analytical Processing - Онлайн аналитична обработка.

REST - Representational State Transfer - Архитектурен подход за създаване на уеб услуги.

SAM - Sequence Alignment Map - Карта на подравняване на секвенции.

SNP - Single Nucleotide Polymorphism - Точкова мутация.

SQL - Structured Query Language - Структуриран език за заявки.

UCSC - University of California, Santa Cruz - Калифорнийски университет Санта Круз.

VCF - Variant Call Format - Формат за описване на варианти.

mRNA/мРНК - Messenger RNA/матрична РНК.

pre-mRNA - Precursor mRNA - Първична мРНК.

ДНК - Дезоксирибонуклеинова киселина.

РНК - Рибонуклеинова киселина.

СЗО - Световна Здравна Организация.

мтДНК - Митохондриална ДНК.

1. Увод

Стареенето е естествен процес, който има огромно значение както за отделния индивид, така и за обществото като цяло. С напредването на възрастта, рискът от разнообразни заболявания като рак, болест на Алцхаймер, диабет, сърдечно-съдови заболявания и други нараства значително. Смята се, че около две-трети от смъртните случаи при хора се дължат на заболявания, свързани с възрастта. Същевременно, с глобалното нарастване на средната продължителност на живота, проблемите на стареенето засягат все повече хора и имат все по-голямо обществено значение. От социална гледна точка, стареенето оказва значителен икономически и демографски ефект. Тези проблеми превръщат търсенето на терапии за забавянето на стареенето и за справяне с негативните му ефекти в една от най-важните сфери на изследване в съвременната биология.

Въпреки все по-големите средства и усилия, които се влагат в изследване на стареенето, процесът все още остава недостатъчно добре разбран. Това се дължи на неговата голяма сложност и на изобилието от механизми, които участват в него и контролират неговите изяви. Установено е, че процесът стареене се влияе от множество генетични и епигенетични фактори, които се намират в сложни взаимодействия. Именно те са предмет на задълбочени изследвания от различни науки. Настоящата дипломна работа се фокусира върху генетичната основа на стареенето. В тази област се търсят кои са гените, които контролират стареенето, как осъществяват това и съществуват ли техни варианти, които водят до подобряване или влошаване на фенотипните прояви на процеса на молекулно, клетъчно, тъканно и организмово ниво. Важен метод за изследването на тези въпроси е анализът на генетични варианти. Това създава голямо количество данни, които трябва да бъдат анализирани. Налични са множество различни биоинформатични инструменти, покриващи различни аспекти от обработката на файлове с генетични варианти - анотация, филтриране, анализ и т.н. Повечето от тях, обаче, изискват значителни технически познания, което ги прави трудни за използване от специалисти в други области, като биология

и генетика.

Това налага и активното търсене на симбиоза между биологичните и компютърни науки. В момента се разработват различни алгоритми и подходи за анализ на тези огромни масиви данни. Предизвикателствата са много. От една страна, биологичната информация е многокомпонентна и сложна. От друга, различните изследователи докладват откъслечни данни, които изискват разпознаване, структуриране и подредба много преди да е започнал компютърният анализ. За тази цел се създават бази данни, които да са удобни за работа и които структурират тази информация в правилния и лесен за работа формат. При този процес се търсят и взаимовръзки, които да подпомогнат изследователите при анализа на тези данни. Това прави всички усилия в тази насока значими и важни за прогреса на биологичната наука.

2. Литературен обзор

2.1 Значение на стареенето

2.1.1 Дефиниция

Въпреки, че концепцията за стареене е универсално разбираема, формалната ѝ дефиниция не е тривиална и множество автори дават твърде различни определения за този термин. Аркинг прави преглед на наличната литература и, в резултат, предлага следната дефиниция [1]:

„Стареенето е независима от времето поредица от кумулативни, прогресивни, свойствени и вредящи структурни и функционални промени, които обикновено започват да се изразяват в репродуктивната зрялост и приключват със смъртта.“

Макар времето да няма каузална връзка с ефектите на стареенето, то корелацията помежду им е причина обикновено да се говори за ефектите на стареенето като за нещо, настъпващо с напредването на възрастта.

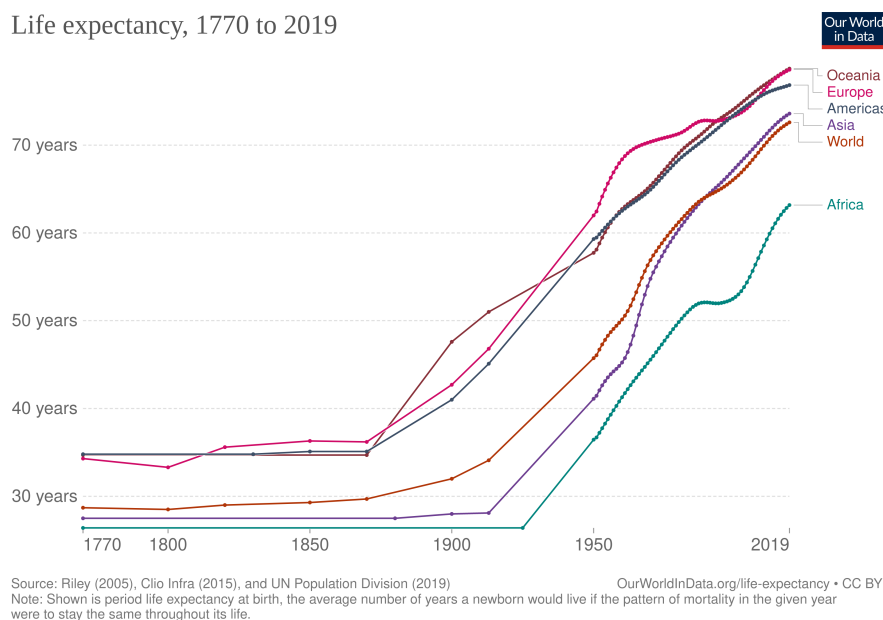
2.1.2 Физиологични ефекти

Стареенето оказва изключително голям ефект върху човешкото тяло. То обикновено включва широк спектър от различни физиологични промени, които влошават жизнеността и качеството на живот на индивида. Примери за това са понижена фертилност при жените [2]; загуба на телесна маса [3]; влошен слух [4]; повишен риск от хронични заболявания [5, 6]; хронична болка [7]; загуба на сила и еластичност в мускулно-скелетната система; понижена способност за устояване на инфекции, екстремни температури и др. видове стрес; влошаване на зрението; загуба на неврологични функции [8] и други.

Тези физиологични промени водят до увеличен риск от редица заболявания, които съответно са най-често срещани сред възрастни хора. Една от основните промени, които настъпват по време на стареенето, е нарушената регулация на имунния отговор, което води до хронично системно възпалително състояние [9]. Много проучвания показват, че хроничното възпаление може да има сериозна роля в широк спектър от свързани с възрастта заболявания, включително рак, диабет, сърдечносъдови, белодробни, неврологични и автоимунни заболявания [10, 11].

2.1.3 Демографски и икономически ефекти

През последния един век очакваната продължителност на живота в целия свят драстично се е повишила [12] (Фигура 1). Освен безспорните ползи, това води и до редица проблеми. Удължаването на продължителността на живота, в комбинация с наблюдавания спад на раждаемостта, се очаква да доведе до застаряване на населението [13]. Световната Здравна Организация (СЗО) предупреждава, че се очаква между 2015 и 2050 броят на хората над 60-годишна възраст да се повиши до 22% [14]. Същевременно, по данни на СЗО, увеличаването на продължителността на живота (с 6 години за периода между 2000 и 2019) изпреварва увеличаването в продължителността на здравословния живот (с 5.4 години за същия период) [15].



Фигура 1: Очаквана продължителност на живота за различни региони през периода 1770-2019 [12].

Застаряването на населението оказва неблагоприятен ефект и върху икономиката на държавите. Първо, заради увеличаването на дяла на хора, които не участват в работната сила. Второ, защото здравните системи са допълнително натоварени с по-голям брой хора в напреднала възраст, за които рисковете от хронични заболявания са значително по-големи. Например, разходите за лечение на Алцхаймер възлизат на 305 милиарда щатски долара годишно, като се очаква със застаряването на населението тези разходи да достигнат над 1 трилион щатски долара [16]. Разходите за третиране на диабет се очаква да достигнат над 2 трилиона долара до 2030 година [17].

2.2 Молекулярно-биологични основи на живата материя

Старееенето е универсален процес, който се наблюдава при всички живи същества. Темповете на остаряване до известна степен имат индивидуални разлики, но са сравнително хомогенни сред всички представители на определен вид. Това подсказва, че съществуват генетични и наследствени фактори, които са еволюционно консервативни и предопределят продължителността на живота, както съществуват такива фактори, които определят различни други фенотипни характеристики при този процес. Систематичното и сериозно изследване на наследствеността започва през 19-ти век с работата на Грегор Мендел, който изучава научно моделите, по които определени характеристики биват предавани от едно поколение на друго. Следващите поколения учени откриват, че съхраняването и изразяването на генетичната информация има забележителни сходства във всички познати форми на живот.

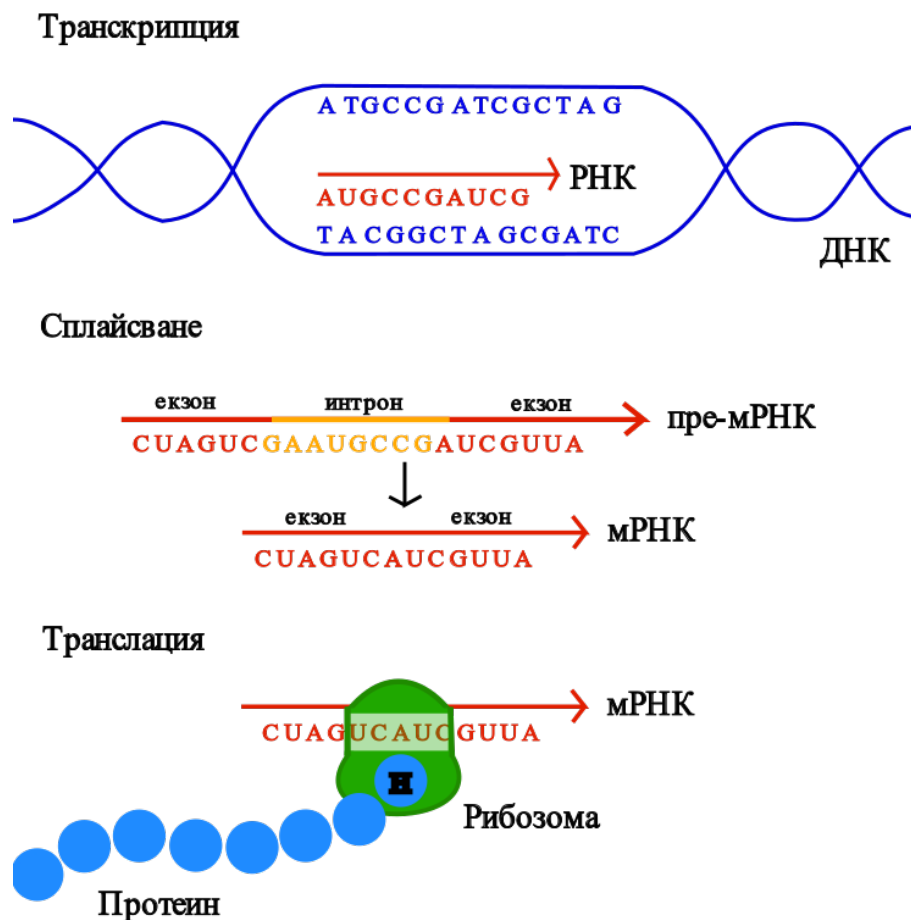
Сред всички познати видове, генетичната информация се съдържа в два вида нуклеинови киселини - рибонуклеинова киселина (РНК) и дезоксирибонуклеинова киселина (ДНК) [18]. ДНК представлява полимер, съставен от две полинуклеотидни вериги, навити една около друга, така че да образуват двойноспираловидна структура. Полинуклеотидните вериги са създадени от последователности от мономери - нуклеотидни бази. В състава на ДНК се включват четири вида бази - аденин (А), цитозин (С), гуанин (G) и тимин (Т). Базите А и Т образуват двойки помежду си, както и базите С и G. Казваме, че двете полинуклеотидни вериги на ДНК са комплементарни. Всеки ген може да бъде разположен на двете вериги на ДНК и се описва от последователност от нуклеотидни бази с различни дължини

[19]. РНК молекулата представлява едноверижна полинуклеотидна верига, като в нейната молекула вместо тимин (Т) се използва урацил (U). РНК молекулата е химически по-реактивна от ДНК и по-нестабилна [20, 21]. Поради тази причина, извън вирусите, РНК молекулата рядко се използва за дълготрайно съхранение на генетична информация и изпълнява други роли, като спомага при копирането на генетичната информация от ДНК (транскрипция) и превеждането ѝ в протеин (транслация).

Централната догма в молекулярната биология представя основния път за реализация на генетичната информация в посоката ДНК (ген)-РНК-протеин [22]. Първата стъпка към това е транскрипцията, при която ензими от семейството на ДНК-зависими РНК-полимерази копират информацията от ДНК в комплементарни РНК молекули [23]. За целта, РНК-полимеразата се свързва с определен участък преди началото на гена, наречен промоторен участък. Следва процеса на елонгация, при който ензимът се плъзга по шаблонната ДНК нишка и удължава РНК молекулата, като съпоставя комплементарна нуклеотидна база за всяка база от матричната нишка. При достигане на участък наречен терминатор, процесът приключва и РНК-полимеразата, първичната РНК молекула и ДНК нишката се отделят една от друга.

След транскрипцията първичната РНК молекула (pre-mRNA) преминава процес на сплайсване, при който некодиралите части от нея (интрони) биват изрязвани и отстранени. Останалите кодиращи части (екзони) се снаждат отново. Този процес се осъществява от комплекси от протеини, наречени сплайсономи. Първичната РНК може да бъде сплайсната по алтернативни начини, което дава възможност за образуването на голям брой различни протеинови изоформи от малък брой гени [24]. Между 40% и 60% от човешките гени имат алтернативни сплайсови форми [25]. След сплайсването си, първичната РНК молекула е трансформирана в зряла матрична РНК (мРНК/mRNA), и се изнася чрез активен транспорт от ядрото в цитоплазмата [26].

Зрялата мРНК бива транспортирана до рибозомите, където генетичната информация, която тя пренася се използва, за да се синтезира протеин. Рибозомата синтезира протеина, като на всеки кодон (група от три нуклеотидни бази) от мРНК молекулата се съпоставя определена аминокиселина (Фигура 2). Веригите от аминокиселини образуват протеини [27].



Фигура 2: Графична репрезентация на процесите на транскрипция, сплайсване и транслация. Транскрипцията е процесът на копиране на генетичната информация от ДНК молекулата в първична РНК молекула. Сплайсването е пост-транскрипционна модификация, при която се изрязват региони, наречени интрони, като е възможно алтернативно сплайсване на ген, позволяващо кодирането на множество протеини от един ген. Транслация е процесът, при който спрямо генетичния код в зрялата мРНК молекула се синтезира протеин.

Протеините са макромолекули, изградени от верига аминокиселини, които имат ключова роля за редица процеси в организма, включително катализирането на метаболитни реакции [28], регулацията на генетичната експресия [29] клетъчната сигнализация [30], образуването на структурите на клетките [31], транспорта на молекули [32] и други. Изменения в протеин-кодиращата ДНК могат да имат ефект върху състава, структурата и функцията на протеина [33].

2.3 Молекулярно-биологични характеристики на стареенето

Стареенето е въпрос, който вълнува учените от дълго време. През 1990-та, Медведев твърди, че вече съществуват над 300 теории за стареенето [34]. Въпреки постигнатият значителен прогрес през последните години в областта на геронтологията, причините за стареенето все още остават ненапълно обяснени. Това се дължи на факта, че стареенето е сложен процес, в който са намесени множество фактори. Все още липсва голяма обединяваща теория на стареенето, която да обясни изцяло процеса, но съществуват множество теории, които дават добра представа за различни негови аспекти [8]. Съществуват данни, обединяващи основните биологични характеристики на процеса в девет на брой белези на клетъчното стареене (Фигура 3).



Фигура 3: Основните биологични характеристики на стареенето [35].

2.3.1 Натрупване на геномни изменения

Изменения в ДНК молекулите могат да настъпят както в следствие на вътрешноклетъчни фактори, така и поради въздействието на външни мутагени. Примери за вътрешноклетъчни фактори са случайни грешки при репликацията и оксидативния стрес, предизвикан от натрупването на свободни радикали [36]. Външните мутагени могат да бъдат разделени на три вида - физични, химични и биологични. Пример за физичен мутаген е радиацията [37], а за биологичен вирусните инфекции, които също могат да предизвикат генетични мутации. Измененията в ДНК молекулите включват различни видове мутации като точкови мутации, делеции и инсерции, транслокации, инверсии и др.

Съществуват механизми, чрез които клетките разпознават мутациите и ги поправят и те се обуславят от процес, наречен ДНК поправка. Тези механизми не са ефективни на 100% и ефективността им допълнително спада с възрастта [38]. В резултат, с течение на времето, ДНК молекулите акумулират все повече мутации. Смята се, че тази геномна нестабилност е един от основните фактори, допринасящи за процеса на стареенето [39].

2.3.2 Съкращаване на теломерите

Теломерите са регион, намиращ се в края на хромозомите, в който се съдържат повтарящи се поредици от нуклеотидни бази. Те служат за предпазване на хромозомата от рекомбинация и постепенна деградация и дават възможност на клетката да различава края на хромозомата от случайни скъсвания, при които биха били активирани механизмите за поправка на ДНК [40]. При всеки цикъл на делене на клетката, теломерите се скъсват поради непълното синтезиране на изоставащата нишка от ДНК полимеразата [41]. Този проблем се компенсира донякъде от ензима теломераза, който пренася своя собствена РНК молекула и я използва като шаблон, спрямо който да удължи скъсения теломер. Въпреки това, недостатъчната експресия на теломеразата води до постепенното скъсяване на теломерите. Това може да доведе до загуба на репликативна способност на клетката и блокирането на клетъчния цикъл, процес известен като клетъчно стареене [42]. Установено е, че първоначалната дължина на теломерите няма връзка със стареенето при различни видове, но скоростта на тяхното скъсяване има значителна корелация с продължителността на живота им [43].

2.3.3 Клетъчно стареене

През 1961 Хейфлик и Муурхед показват, че клетки отглеждани в култура имат ограничен капацитет за клетъчно делене [44]. Процесът на загуба на репродуктивни способности и спирането на клетъчния цикъл е известен като клетъчно стареене (cellular senescence). Клетъчното стареене може да настъпи в следствие от различни вътрешни и външни фактори, включително скъсяване или дисфункция на теломерите, онкогенеза или увреждане на ДНК [45]. Така, клетъчното стареене има важна роля за потискането на развитието на тумори като прекратява размножаването на раковите клетки [46]. Същевременно обаче, загубата на способност за делене на клетките, която е критична за замяната на увредените клетки и обновяването на тъкните, дава основание да предположим, че клетъчното стареене може да има роля и в процеса на стареене на организма. Тази хипотеза се подкрепя и от *in vivo* изследвания, които показват, че с напредъка на възрастта се наблюдава натрупване на остарели клетки [46]. Асоциативни-изследвания върху целия геном (Genome Wide Association Studies или GWAS) откриват, че locusът *INK4/ARF*, кодиращ свързани с клетъчното стареене протеини, има силна асоциация с множество свързани с възрастта заболявания като рак, синдром на Алцхаймер, старческа немощ и др [47].

2.3.4 Епигенетични изменения

Епигенетичните изменения са промени в активността и експресията на гените без да се променя ДНК секвенцията. Някои епигенетични промени са обратими, докато други се унаследяват и се обозначават като епигенетична наследственост. Епигенетичните промени имат ключова роля за запазването на стабилността на генома и осигуряват правилното развитие на индивида [48]. Примери за епигенетични промени са ДНК метилирането и хистоновите модификации. И за двете се смята, че са значими фактори в процеса на стареенето [49, 50], както и следствие от него.

ДНК метилирането представлява добавяне на метилови групи към базите цитозин в ДНК молекулата, като една от основните му роли е да потиска транскрипцията на гени. С напредването на възрастта се наблюдава понижаване на нивата на общото ДНК метилиране, с изключение на някои специфични региони, при които нивото се повишава [51]. ДНК метилирането е важна и променяща се със стареенето епигенетична модификация. Има много големи бази данни с това как и къде това ДНК метилиране се променя в хода на стареенето. Тези данни се използват за разработване на

биологични часовници на стареенето [52].

Хистоните имат важна структурна роля при организирането на генома в хроматин. Основната изграждаща единица на хроматина е нуклеозомата. Тя представлява 147 базови двойки от ДНК, увити 1.65 пъти около хистонов октамер. Връзката между хистоните и ДНК молекулата поддържа ДНК молекулата недостъпна за ензимите, участващи в различни процеси върху нея. Този проблем бива преодолян от група протеини и ензими, които се грижат за отделянето на хистоните от ДНК молекулата и последващото им свързване [53]. Посттранслационни модификации на опашките на хистоните като метилиране и ацетилиране на хистоните може да доведе както до потискане на транскрипцията, така и до нейната активация, в зависимост от хистоните и техните модифицирани аминокиселини, както и от нивата на тези модификации [54]. В хода на стареенето се наблюдава динамична промяна в тези модификации и те често се използват като белези и часовници на стареенето.

2.3.5 Загуба на протеостаза

Всички клетки поддържат своята протеинова хомеостаза или протеостаза чрез прецизно координирани системи, които бързо коригират нежеланите промени в структурата и нагъването на белтъчните молекули [55]. За целта, неправилно нагънатите протеини биват поправяни или, ако това е невъзможно, деградирани и отстранени напълно от клетките. Старееенето, както и някои свързани с него заболявания, се свързват с нарушена способност за запазване на протеостазата в клетките [35]. Затова и нарушената протеостаза е един от белезите на клетъчното стареене.

2.3.6 Нарушена клетъчна сигнализация

Изследвания на моделни организми показват, че генетични мутации, понижаващи активността на клетъчната сигнализация за наличие на хранителни вещества, могат да доведат до значително удължаване на продължителността на живота. Понижаването на активността на тези сигнални пътища води до подобно физиологично състояние, като това при естествени периоди на недостиг на храна в природата. Известно е, че ограничаването на храненето (намаляване на приема на храна без недохранване) удължава средната и/или максималната продължителност на живота на различни организми, включително дрожди, мухи, червеи, риби, гризачи и макаци резус [56].

2.3.7 Митохондриална дисфункция

С напредването на възрастта, при бозайниците се натрупват соматични мутации на митохондриалната ДНК (мтДНК), водещи до намаляване на действието на дихателните вериги и влошаване на митохондриалните функции [57]. Множество изследвания [58, 59] показват, че митохондриалната дисфункция води до ускорено стареене и настъпване на редица физиологични промени, свързани с възрастта, като например загуба на тегло, намаляване на подкожната мастна тъкан, алоpecia (косопад), кифоза (изкривяване на гръбначния стълб), остеопороза, анемия, намалена плодовитост и уголемяване на сърцето [57].

2.3.8 Изчерпване на резервоара на стволови клетки

Изследвания показват, че стареенето може да се дължи отчасти и на изчерпването на стволовите клетки, които имат ключова роля в обновяването на тъканите. Потенциалните причини за изчерпването на стволовите клетки са многобройни, но общоприета е теорията, че тези клетки се губят в резултат на естествено възникващи мутации и увреждания на ДНК, които водят до клетъчна смърт [60, 61].

2.3.9 Промени в междуклетъчната комуникация

Освен промени в отделните клетки, стареенето включва и промени на ниво междуклетъчна комуникация [35]. Дерегулацията на междуклетъчната комуникация може да доведе до редица негативни последици, като например хронични възпаления, нарушена функция на имунната система, увеличаване на свързания със стареенето секреторен фенотип (Senescence-Associated Secretory Phenotype), промени в комуникацията на ендокринната и невронната системи и други [62].

2.4 Генетични фактори, влияещи на процеса на стареене

В секция 2.2.2 беше представен кратък обзор на различните биологични процеси, които способстват процеса на стареене. Предвид факта, че тези процеси също биват контролирани от действието на определени гени [63, 64, 65], уместно е да предположим, че промени в тези гени могат да повлияят и на процеса на стареене като цяло, както положително така и

отрицателно. Има множество примери за това, съществуващи в научната литература, като голяма част от тях са събрани в публичната база данни Human Ageing Genomic Resources (HAGR) [66], която представлява колекция от ресурси за изследването на стареенето при хората. Някои записи в HAGR са включени на база установена директна връзка между даден ген и стареенето, докато други са включени на база ролята на гена в различни човешки патологии. Много от записите са подбрани на база на съществуваща хомология в различни организми. Към момента в HAGR са налични над 300 човешки гена, за които се предполага, че имат потенциална връзка със стареенето [66].

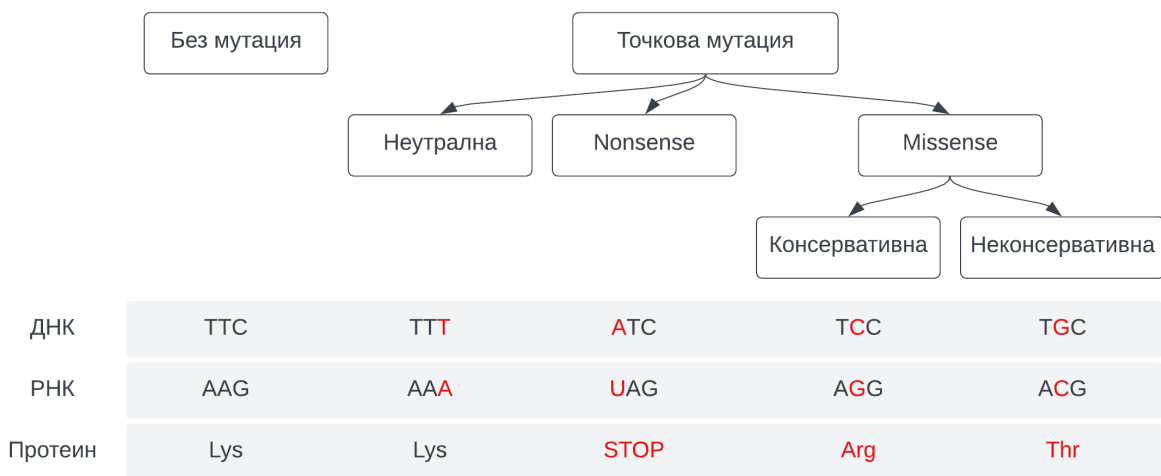
2.4.1 Видове генетични варианти

Съществуват различни видове генетични варианти, като например точкови мутации, инсерции, делеции, инверсии, дубликации и др. Ефектът им може да варира от никакъв до инактивиране на жизненоважни гени [67]. Мутациите могат да засегнат както протеин-кодиращи региони в генома, така и интрони или региони между гени, като дори мутации в междугенните региони могат да имат значително въздействие [68].

Точкови мутации

Точковата мутация представлява замяна на една нуклеотидна база от референтния геном с друга. Това е най-често срещаният тип генетични варианти, като един човешки геном може да съдържа между 3.5 и 4.3 милиона точкови мутации. Заедно с кратките инсерции и делеции, точковите мутации съставляват около 99,9% от всички генетични варианти [69]. В зависимост от ефекта, който вариантът има върху кодиращия протеин, се делят на няколко вида (Фигура 4).

Неутралните (synonymous) мутации променят кодона към друг, който кодира същата аминокиселина. Такива мутации обикновено не се очаква да променят фенотипа, но съществуват и изключения [70]. Nonsense мутациите, заменят кодона с такъв, който води до прекратяване на транслацията. Това създава частичен протеин, който може да загуби функция си [71]. Missense мутациите водят до промяна на аминокиселината, която кодона кодира. Ако новата аминокиселина има сходни свойства с референтната, мутацията се нарича консервативна, ако не, то тогава тя се означава като неконсервативна.



Фигура 4: Различни видове точкови мутации и примери за тях.

Пример за точкова мутация, която се асоциира със стареенето, е вариантът Rs2075650 в гена *APOE*, кодиращ протеина Аполипопротеин Е, който има роля в метаболизма на мазнини [72, 73].

Инсерции и делеции

Тези мутации представляват добавяне или премахване на между 1 и 10000 нуклеотидни бази от генома [74]. Те представляват вторите най-често срещани генетични варианти, като всеки човек има средно 550-625 хиляди такива полиморфизми в генома си [69]. Ако дължината на инсерцията или делецията не е кратна на три, вариантът създава frameshift мутация (мутация с изместване на рамката на четене). Това може да промени до голяма степен секвенцията на кодиращия протеин от мутацията до края на протеина или до следващата frameshift мутация, която да възвърне оригиналната рамка в редките случаи, когато не се е появил нежелан стоп кодон. Инсерции и делеции, предизвикващи изместване на рамката на четене, са редки в кодиращите части от генома, но се срещат често в не кодиращите региони [75].

Други

Съществуват и множество други, по-големи структурни мутации, които са по-редки, но обхващат по-голям брой нуклеотидни бази [69]. Те включват големи делеции (10000 или повече бази), промяна в броя на копията на дадена последователност, инверсии и други.

2.5 Биоинформатика

Количеството данни, което се генерира в областта на биологическите науки, през последните години бележи забележителен ръст [76]. Например, Европейският институт по биоинформатика през 2020 година отчита, че съхранява 390 петабайта данни [77]. За работа с подобно количество информация се нуждаем от помощта на компютърни системи. Тук се явява и важната роля на биоинформатиката, която представлява науката за прилагането на компютърно-изчислителни техники за обработка на информация, свързана с анализи и изследване на различни биомолекули [78].

Биоинформатиката има три основни цели [78]. Първата е съхраняването на големите обеми от данни по начин, който дава възможност на изследователите да намират и достъпват наличната информация, както и да добавят нова такава. Втората цел е разработката на инструменти и ресурси, които да спомагат за анализа на данни. Третата цел е използването на тези инструменти за анализа и интерпретацията на данни, с цел отговор на някакъв биологически въпрос.

Биоинформатиката намира приложение в изключително много аспекти от съвременните биологически изследвания. Съвременните техники за геномно секвениране (Next-Generation Sequencing) разчитат на различни биоинформатични техники за всички стъпки от процеса: от анализ на сигналите и разпознаване на нуклеотидните бази, подравняването на сегменти спрямо референтен геном, до асемблирането на цялостен геном [79]. След като геномът е секвениран, той трябва да бъде картиран и анотиран, за да се добавят връзките между определени геномни региони и биологическите им функции [80]. За тази цел, също могат да се използват автоматизирани биоинформатични решения [9]. Други примери за области, където се прилагат биоинформатични техники са, например, асоциативни изследвания, търсещи статистически връзка между генетични варианти и определни фенотипи [81], предсказване на триизмерната структура на протеини [82], дизайн на лекарства [83], изследване на еволюционното развитие на видове [84] и други.

2.6 Значение на биоинформатиката за изследването на стареенето

Изучаването на стареенето при хората среща две големи затруднения. На първо място това е сложността на фенотипа на стареенето и множеството различни изменения в организма, настъпващи с него. На второ, трудността на провеждане на *in vivo* изследвания на хора, които също така имат сравнително голяма продължителност на живота, се явява сериозна пречка за изследване на процеса в хора. Поради тези причини, много изследователи на стареенето използват различни моделни организми за своите изследвания. При някои видове, като например мишките и приматите, се наблюдава забележително генетично сходство с хората и подобни фенотипи на стареенето, което често, обаче, има много различна скорост. За да разберем причините за тези разлики, днешните технологии ни дават възможност за генерирането на големи количества данни, които могат да бъдат анализирани посредством различни биоинформатични техники. Такива са сравнителния геномен анализ, филогенетичното генотипизиране („footprinting“ отпечатване), използването на ДНК микрочипове за намиране на нивата на експресия на гени, *in silico* методи за моделиране на генрегулаторни мрежи и други [85].

2.7 Обзор на съществуващи биоинформатични решения

В биоинформатиката се използват множество различни инструменти и софтуерни решения, които покриват различни части от обработката и анализа на разнообразните биологични данни, които учените акумулират.

2.7.1 VCF файлове

Variant Call Format (VCF) е стандартен файлов формат, който се използва за описване на генетичните полиморфизми за дадена секвенция (Фигура 5). VCF е текстов файлов формат с разделители-табулации (tab-delimited), който често бива съхраняван в компресиран вид, с цел оптимизиране на хардурерните ресурси, като дори компресиран може да бъде индексирани за бързо търсене. Във VCF могат да бъдат описани различни видове полиморфизми, от прости като точкови мутации, инсерции и делеции до по-сложни като например инверсии. VCF може да съдържа коментари, заглавен ред и

редове за данни. В редовете за данни, всеки ред показва един полиморфизъм, като обикновено се използват стандартни референтни геноми, пряко които се определят полиморфизмите. Файловият формат позволява и добавянето на богата анотация и потребителски-дефинирани полета. VCF стандартът е разработен за 1000 Genomes Project, а впоследствие е добил широка приемственост в биоинформатичната общност [86].

```
##fileformat=VCFv4.2
##fileDate=20090805
##source=myImputationProgramV3.1
##reference=file:///seq/references/1000GenomesPilot-NCBI36.fasta
##contig=<ID=20,length=62435964,assembly=B36,md5=f126cdf8a6e0c7f379d618ff66beb2da,species="Homo sapiens",taxonomy=x>
##phasing=partial
##INFO=<ID=NS,Number=1,Type=Integer,Description="Number of Samples With Data">
##INFO=<ID=DP,Number=1,Type=Integer,Description="Total Depth">
##INFO=<ID=AF,Number=A,Type=Float,Description="Allele Frequency">
##INFO=<ID=AA,Number=1,Type=String,Description="Ancestral Allele">
##INFO=<ID=DB,Number=0,Type=Flag,Description="dbSNP membership, build 129">
##INFO=<ID=H2,Number=0,Type=Flag,Description="HapMap2 membership">
##FILTER=<ID=q10,Description="Quality below 10">
##FILTER=<ID=s50,Description="Less than 50% of samples have data">
##FORMAT=<ID=GT,Number=1,Type=String,Description="Genotype">
##FORMAT=<ID=GQ,Number=1,Type=Integer,Description="Genotype Quality">
##FORMAT=<ID=DP,Number=1,Type=Integer,Description="Read Depth">
##FORMAT=<ID=HQ,Number=2,Type=Integer,Description="Haplotype Quality">
#CHROM POS ID REF ALT QUAL FILTER INFO FORMAT NA000001 NA000002 NA000003
20 14370 rs6054257 G A 29 PASS NS=3;DP=14;AF=0.5;DB;H2 GT:GQ:DP:HQ 0|0:48:1:51,51 1|0:48:8:51,51 1/1:43:5:,,
20 17330 . T A 3 q10 NS=3;DP=11;AF=0.017 GT:GQ:DP:HQ 0|0:49:3:58,50 0|1:3:5:65,3 0/0:41:3
20 1110696 rs6040355 A G,T 67 PASS NS=2;DP=10;AF=0.333,0.667;AA=T;DB GT:GQ:DP:HQ 1|2:21:6:23,27 2|1:2:0:18,2 2/2:35:4
20 1230237 . T . 47 PASS NS=3;DP=13;AA=T GT:GQ:DP:HQ 0|0:54:7:56,60 0|0:48:4:51,51 0/0:61:2
20 1234567 microsat1 GTC G,GTCT 50 PASS NS=3;DP=9;AA=G GT:GQ:DP 0/1:35:4 0/2:17:2 1/1:40:3
```

Фигура 5: Примерен VCF файл

2.7.2 Анотация на генетични варианти

С напредъка на технологиите за секвениране способността за бързо генериране на големи обеми от данни за генетични варианти расте. Същевременно се образува все по-голяма пропаст между възможностите за генериране на нови сурови данни и възможностите за извличане на полезна информация и познание от тях [87]. Основна стъпка за разбирането на суровите данни с генетични варианти е аотирането им. Анотацията представлява процес, при който към генетичните варианти се добавя допълнителна функционална информация [88]. Това може да бъде информация към кои кодиращи секвенции и гени се отнася варианта, оценка на степента му на въздействие, индикация дали се променят аминокиселините на кодиращия протеин [89], предсказване на структурните и функционални промени в протеина [88] и др.

snpEff

SnEff е софтуер с отворен код, който може бързо да аотира и категоризира генни варианти на база на ефекта, който те биха имали върху аотира-

ните гени. SnpEff поддържа анотация на различни видове полиморфизми, като например единични нуклеотидни полиморфизми (SNPs), множествени нуклеотидни полиморфизми (MNP) и вмъквания-изтривания (Indels) [89]. SnpEff разполага с много богата база данни от различни референтни геноми, с които може да работи, а дава възможност на потребителя да използва и свой собствен референтен геном. Основният формат, с който SnpEff работи е VCF. След обработката на входния VCF файл, съдържащ по един полиморфизъм на ред, SnpEff добавя една или повече анотации за всеки полиморфизъм в полето INFO, като всяка анотация има ключ „ANN“. Някои от по-важните анотации, които SnpEff предоставя са: идентификация на генът, с който е свързан полиморфизма; идентификатори на транскриптите, които полиморфизмът засяга; оценка на ефекта на полиморфизма и на промените, които би причинил в аминокиселинния състав на протеина, който кодира. SnpEff е имплементиран на програмния език Java, което го прави лесно преносим и му дава възможност да работи на изключително голям набор от операционни системи и устройства [90]. Програмата предоставя интерфейс, използващ командния ред на операционната система.

VEP

Част от проекта Ensembl, VEP (Variant Effect Predictor) е инструмент за анализ и анотация на генетични варианти. Софтуерът е с отворен код, свободен за използване от всеки и поддържа пълна възпроизводимост на резултатите. VEP има разнообразни интерфейси. Той може да бъде достъпван като уеб услуга, чрез удобен потребителски интерфейс. Също така предоставя REST API, работещ със стандартния формат за сериализация JSON, което го прави удобен за интеграция с програми, независимо от използваните за тях програмен език и технологии. Възможно е и да бъде свален като Perl скрипт и използван локално, чрез командния ред на операционната система, като необходимите бази данни могат да бъдат кеширани също локално, за по-голямо бързодействие [91]. VEP анотациите съдържат разнообразна информация, включваща молекулярните последствия на варианта (което в snpEff наричат ефект), засегнатия ген и транскрипти, в кой екзон е полиморфизмът, определяне на промяната в аминокиселинния състав на протеина и оценка на въздействието [92].

Annotator

Annotator (ANNOtate VARIation) е програма за анотация и приоритизация на генетични варианти. Annotator е имплементиран на Perl и може да

бъде свален и използван свободно за лични, научни и некомерсиални цели. Достъпна е и уеб версия, известна като wAnnoVar (<https://wannovar.wglab.org/>). AnnoVar може да аотира варианти спрямо различни човешки референтни геноми, както и спрямо референтни геноми на различни видове моделни организми. Освен да аотира функционалните ефекти на генетични варианти, AnnoVar има и допълнителни функционалности. Възможно е аотиране спрямо геномни региони, различни от гени, като например известни добре запазени области от генома, предсказани участъци за прикрепяне на транскрипционни фактори, предсказани целеви участъци за микроРНК молекули и др. AnnoVar, също така, дава възможност за сравнение на варианти с вече известни такива, които са налични във външни бази данни [93].

2.7.3 Филтриране и анализ на генетични варианти

snpSift

Snpsift е софтуер за филтриране и промяна на VCF файлове, съдържащи аотирани генетични варианти. Чрез Snpsift могат да се извършат различни операции, като например филтриране по геномен регион, разделяне на файла по хромозома, извличане на определени полета, допълнително аотиране спрямо външни бази данни, както и филтриране с потребителски дефиниран логически израз. Филтрирането с потребителски израз работи посредством рекурсивна граматика, която може да обработва изрази с произволна сложност [94]. Това прави Snpsift доста мощен инструмент за лесна обработка и анализ на генетични варианти и извличане на информация от тях. Snpsift, също като Snpeff, е имплементиран на програмния език Java, което му дава голяма преносимост върху различни операционни системи и платформи [90]. Интерфейсът за работа със Snpsift също използва командния ред.

bcftools

Bcftools е програма, предлагаща множество команди за обработката и анализа на VCF файлове, компресирани VCF файлове и бинарния им еквивалент - BCF файлове. Програмата автоматично засича формата на входните данни, без да е необходимо потребителят да го индикира. Една от командите на Bcftools е view. Тя дава възможност за филтриране и конвертиране на VCF и BCF файлове. При филтрирането могат да бъдат зададени

голям набор от разнообразни критерии, като например по зададени геномни региони, тип на полиморфизма (точкова мутация, вмъквания-изтривания, и тн.), брой на алелите, и др. Възможно е и да се филтрира по булев израз, включващ кои да е полета от VCF файла [95].

Cutevariant

Cutevariant е програма с графичен потребителски интерфейс, която позволява филтрирането на генетични варианти заредени от вече анотиран VCF файл. Програмата поддържа файлове, анотирани със SnpEff или VEP. При зареждане на файл, програмата го обработва и записва информацията в SQLite база данни. Това позволява данните да бъдат филтрирани със сложни филтри, които могат да бъдат контролирани както посредством графичния потребителски интерфейс, така и посредством VQL - специален език, наподобяващ SQL [96].

2.7.4 Геномни браузъри

В последните години биологическите науки се превръщат в една от областите генериращи най-голямо количество данни [97]. Развитието на NGS технологиите намалява цената и увеличава скоростта на секвенирането [98]. В резултат, геномите на вече десетки хиляди организми са секвенирани и достъпни в онлайн бази данни, предоставящи информацията публично за свободно ползване [99]. Освен секвенции, тези бази данни съдържат най-различни видове анотации, като например позициите на известни или предсказани гени, мРНК транскрипти, информация за генна експресия, генетични полиморфизми, сравнения с други организми, информация за епигенетични маркери, като нива на метилиране, и др.

Есенцията на геномните браузъри е представянето на различните видове данни като отделни информационни ленти една под друга, на които геномните координати са подравнени по вертикалната ос. По този начин потребителят може лесно да види дали има определени съвпадения, или разлики в информацията от различните ленти и да направи изводи за функцията или други характеристики на дадения геномен регион. Интеграцията на секвенции и богат набор от анотации прави геномните браузъри удобна платформа, чрез която молекулярните биолози могат да разглеждат, търсят, извеждат или анализират информация за генома ефективно и удобно [100].

UCSC Genome Browser

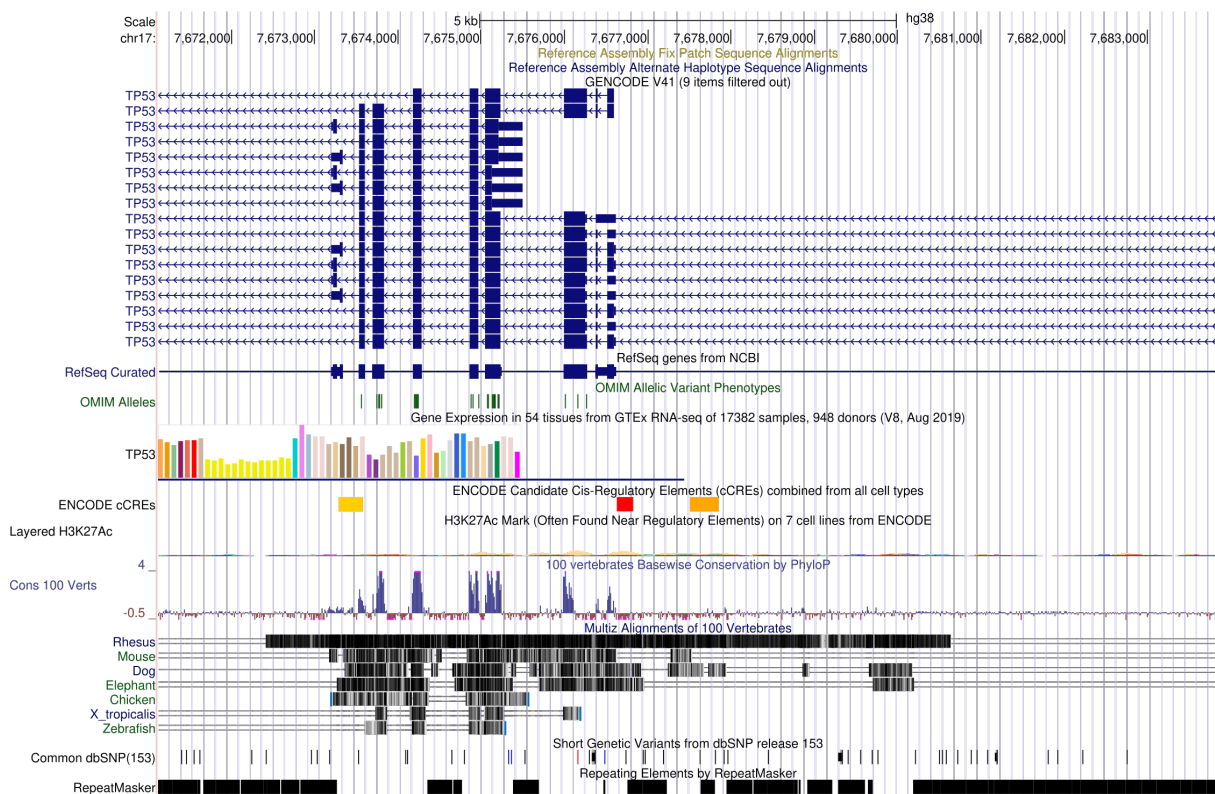
На 22 юни 2000 година, UCSC (University of California, Santa Cruz) и другите членове на международния проект за секвениране на човешкия геном завършват първата работна версия на човешкия геном. Няколко седмици по-късно на 7 юли 2000 година, асемблирания геном става публично достъпен на уеб сайта на UCSC. Заедно с него става достъпен и графичен инструмент за разглеждането му - UCSC Genome Browser.

UCSC Genome Browser (Фигура 6) предоставя достъп и инструменти за разглеждане, сравняване и анализиране на геномите на голям набор от организми [101]. Анотациите и информацията, представена от UCSC, идва от разнообразни източници, като GENCODE Genes, NCBI RefSeq Genes, Ensembl Genes и др [102]. Също така, потребителят може да зареди анотации от свой собствен файл, като те се добавят като допълнителна информационна лента в браузъра. UCSC Genome Browser предоставя прост графичен интерфейс, който дава възможност на потребителя да навигира из генома с функции като увеличаване и намаляване на резолюцията, преместване, търсене по ген, секвенция или геномна локация и др. При натискане върху обект, браузърът показва подробна информация за него. UCSC Genome Browser има възможност да зарежда и обработва огромни по обем файлове с анотации, без да престава да работи гладко [103]. Браузърът поддържа разнообразни видове файлове, включително VCF [102] и SAM/BAM [101]. Достъпен е както онлайн, така и като самостоятелна програма.

IGV Genome Browser

IGV (Integrative Genomics Viewer) е инструмент за визуализация и интерактивно изследване на разнообразни, големи по обем геномни колекции от данни (Фигура 7). Посредством IGV могат гъвкаво да се интегрират широк спектър от различни типове геномни данни, като например подравнени поредици, мутации, експресия на гени, метилиране, геномни анотации и др. IGV позволява на потребителя да изследва данните си на различни нива на резолюция, като дава възможност за приближаване и отдалечаване в реално време [104, 105]. Данните могат да бъдат зареждани както от публични онлайн бази данни, така и локално от данните, с които разполага потребителят.

Едно от най-големите предимства на IGV е това, че лесно може да бъде интегриран във външна страница. Достатъчно е да бъде импортирана

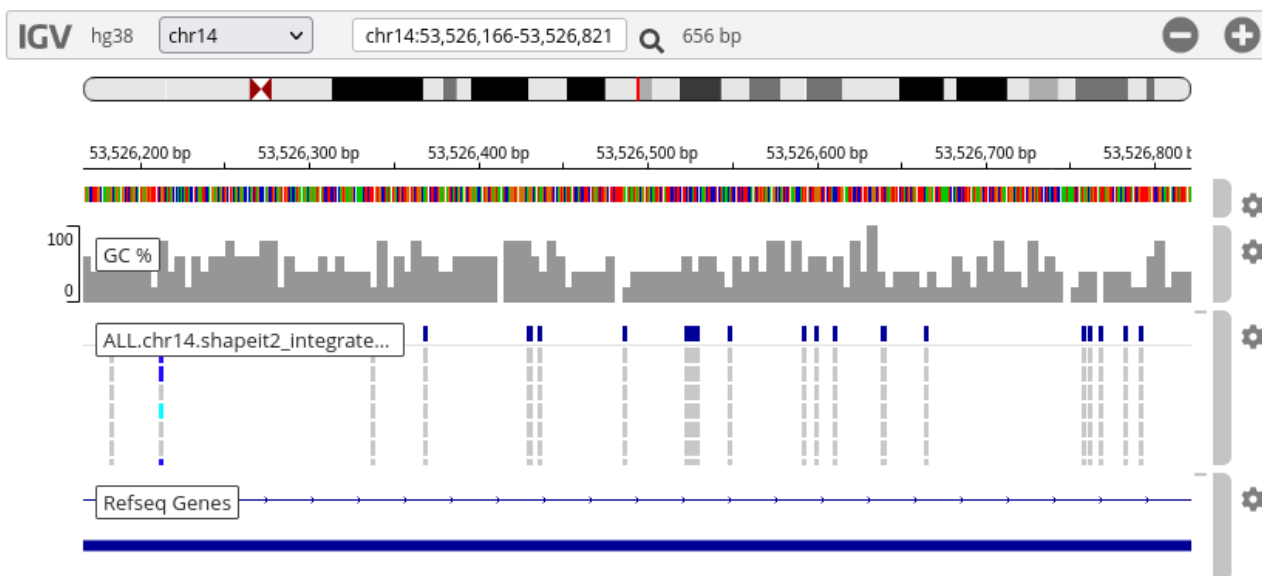


Фигура 6: Примерна визуализация на генът TP53 с UCSC (<http://genome.ucsc.edu>).

JavaScript библиотеката igv.js и да се извика функция за вграждане на геномния браузър в конкретен HTML елемент от страницата. IGV браузърът може да работи с различни файлови формати, като например FASTA, BAM и VCF. Може да поддържа големи обеми от данни, като за целта използва индексни файлове, на базата на които прави асинхронни заявки, за да вземе единствено частите от файла, които трябва да бъдат визуализирани. IGV може да се конфигурира и предоставя JavaScript API за взаимодействие между браузъра и съдържащото го приложение [106].

2.7.5 Биоинформатични решения за определяне на 3D пространствена структура на протеини

Протеините са макромолекули, които представляват дълга верига от аминокиселини. Протеините имат роля в множество процеси в организмите, като например катализирането на реакции, репликацията на ДНК, клетъчната комуникация, транспортирането на молекули, образуването на клетъчната структура и др. Както вече бе разгледано в секция 2.2, ДНК служи като шаблон за транскрипцията на мРНК молекули, които биват транс-



Фигура 7: Примерна визуализация с IGV

лирани в протеини. По този начин генетичният код определя първичната структура на протеина, тоест последователността от аминокиселини. За да станат биологически активни, обаче, протеините трябва първо да заемат определена третична структура в пространството [107].

Триизмерната (третична) нагънатост на протеина се определя от първичната му структура, тоест от последователността от аминокиселини. Движещи сили при нагъването на протеина са хидрофобните интеракции, образуването на между-молекулни водородни връзки и силите на Ван дер Ваалс. Тези сили въздействат докато протеинът не достигне оптимална и стабилна форма [108]. Откритието, че триизмерната структура на протеина зависи почти изцяло от последователността от аминокиселини, поражда търсенето на компютърен алгоритъм, който да може да предскаже триизмерната структура, която определена аминокиселинна поредица би образувала.

Подходи за предсказване на третична пространствена структура на протеини *in silico*

Съществуват множество различни методи, които се опитват да решат проблема за предсказване на триизмерната протеинова структура. Те могат да бъдат разделени на четири групи: първата група са такива, които се основават на базови принципи и не използват информация от външни бази данни; втората група се основават на базови принципи и използват информация от външни бази данни; третата група са threading методи, при които

аминокиселинната поредица се моделира спрямо множество от структурни-скелета, взети от готова библиотека с нагъввания, като за всяко от тях се пресмята оценка за съвместимост; четвъртата група са сравнителни (или хомоложни) методи [109]. Сравнителните методи се опитват да предскажат структурата на даден протеин като идентифицират подобни, вече известни, протеини и ги използват за шаблон, спрямо който да моделират структурата. При тези методи се разчита на наблюдението, че при хомоложните гени (гени, които си приличат поради обща еволюционна история) триизмерната структура на протеина е по-добре запазена от аминокиселинната му последователност [110].

AlphaFold

AlphaFold е създаден от DeepMind [111], дъщерно дружество на Alphabet [112]. Програмата се базира на метода на хомоложното моделиране, като използва невронни мрежи за дълбоко обучение (deep learning). През 2018 година, на тринадесетото издание на международното състезание за предсказване на протеинова структура CASP AlphaFold се класира първа [113]. Две години по-късно, втората версия на програмата AlphaFold2 отново се класира първа на четиринадесетото издание на CASP, като този път точността на предсказаните структури беше далеч по-голяма от постигнатата от всички други участници [82].

TrRosetta

TrRosetta (transform-restrained Rosetta) е платформа за бързо и точно предсказване на триизмерни протеинови структури, базирана на техники за дълбоко обучение и Rosetta, известен софтуер за моделиране на протеини. TrRosetta също използва подхода за хомоложно моделиране за да получи геометричните свойства, включително разстояния и ориентация, между аминокиселините, съставляващи входната протеинова секвенция. Тези предсказани геометрии след това се трансформират в множество от ограничения, които направляват определянето на структурата на протеина на базата на оптимизационни процеси, минимизиращи енергийната функция на структурата [114]. На CASP14 TrRosetta се класира на второ място [115].

2.7.6 Интегрирани софтуерни решения

Galaxy Project

Galaxy е онлайн платформа за научни изчисления, достъпна през уеб браузъра, която позволява на учени да споделят, анализира и визуализират своя собствена информация с минимални технически трудности [116]. Galaxy поддържа голямо разнообразие от стандартни файлове формати, използвани за биологически цели, и дава възможност за интегрирането на различни множества от данни и конструирането на процеси за обработването им [117]. Платформата е достъпна както онлайн, така и като софтуер с отворен код, който може да бъде инсталиран на собствен сървър или компютърен клъстер [118]. Освен, че прави биологическите изследвания по-достъпни, като премахва нуждата от познания по програмиране и компютърни науки за изграждането на биоинформатични процеси за обработка и анализ на данни, Galaxy се стреми да направи всички анализи възпроизводими. За целта, Galaxy записва за всяка стъпка от процеса входните данни, използваните инструменти и техните параметри [119]. Galaxy включва много богат набор от различни инструменти за постигането на различни цели, като например филтриране и подготвяне на входни сурови файлове със секвенции, съпоставяне на секвенции към референтни геноми, категоризиране на генетични варианти, статистически анализи и др [119].

2.8 Обобщение

Стареенето е процес с огромно значение както за отделния индивид, така и за обществото. То причинява множество неблагоприятни физиологични промени в организма и е основен рисков фактор за редица заболявания. Стареенето и свързаните с него заболявания са сериозна тежест за обществото и в икономически, и в социален план. Въпреки това, процесът не е достатъчно добре разбран, което прави трудно създаването на ефективни терапии за справяне с негативните му ефекти. Множеството проведени проучвания в областта показват, че много различни фактори и молекулярни механизми имат роля в процеса на стареене. Важна роля играят генетичната обусловеност и набора от генетични варианти, които се срещат при индивида. Съвременните методи за изследването на тези генетични варианти включват събирането и анализа на голямо количество разнородни и комплексни биологични данни. За тази цел се използват богат набор от различни биоинформатични инструменти. Тези инструменти, обаче, често са тясно специализирани за определени функции и потребителят трябва да

използва комбинация от тях, за да осъществи определен анализ. Допълнително усложнение е това, че много от тях изискват сравнително добри познания по информатика. Тези трудности създават нуждата от разработване на интегрирани биоинформатични инструменти, които да подпомогнат изследователската работа при анализа на генетични варианти, като я направят по-лесна и достъпна.

3. Цели и задачи

3.1 Цел на дипломната работа

Изследване на генетични варианти, свързани със старенеето, чрез създаване на интегрирана софтуерна система за биоинформатичен анализ на геномни варианти с предварително зададени характеристики.

3.2 Задачи

За постигане на целта са поставени следните задачи:

1. Интегриране на софтуер за анотация на генетични варианти.
2. Филтрация на анотираните VCF файлове с генетични варианти, така че да съдържат единствено полиморфизми, засягащи гени, които потребителят е решил да изследва.
3. Анализ на наличните данни и моделиране на релационна база данни, в която данни да бъдат съхранявани с цел последващо изпълняване на разнообразни аналитични заявки.
4. Разработване на уеб-базиран потребителски интерфейс, който да включва:
 - 4.1 Възможност за създаване и управление на генетични множества, спрямо които да бъдат изследвани входните VCF файлове с генетични варианти.
 - 4.2 Възможност за качване на входен VCF файл, съдържащ генетични варианти.
 - 4.3 Набор от страници за изследване на резултатите за обработен VCF файл.

5. Идентифициране на модифицирана полипептидна верига в резултат на доказани мутации в изследваните гени, които я кодират.
6. Интегриране на софтуер за предсказване на третичната (триизмерна) структура на протеини към програмното решение.
7. Интегриране на решение за визуализация на биологични макромолекули, с цел представяне на триизмерната третична структура на референтния и модифицирания протеин с цел сравнението им.

4. Материали и методи

4.1 Използвани софтуерни решения

В настоящата дипломна работа бяха използвани софтуерни решения, които са публикувани в научната литература и са със свободен достъп.

Те включват:

4.1.1 Flask

Flask [120] е минималистичен framework (платформа, която подпомага разработването на софтуер) за създаване на уеб приложения с програмния език Python. Класифицира се като минималистичен, тъй като не налага използването на определени библиотеки и инструменти, а оставя избора да бъде направен от програмиста. За разлика от много други уеб framework решения, Flask не включва определени компоненти и библиотеки за стандартни нужди като връзка с бази данни, валидация на потребителски входни данни, автентикация и др. Вместо това, предоставя възможности за разширяване, към които могат да се вградят произволни външни библиотеки и компоненти.

Flask (v2.1.2) е основен компонент в програмното решение, като го използваме за изграждането на уеб-базирания потребителски интерфейс. Flask се грижи за обработката на HTTP заявките, насочването им към правилния контролер-метод, изграждането на статичните страници (чрез шаблонни страници, рендериращи от библиотеката Jinja), поддържането на потребителската сесия и др.

4.1.2 DuckDB

DuckDB [121] е система за управление на бази данни, която позволява изпълняването на SQL заявки, докато е вградена в друг процес. Това означава, че базата данни не се нуждае от отделен сървър, който да управлява базата данни и да изпълнява заявките. Вместо това, системата може да бъде вградена в програма под формата на библиотека с функции, позволяващи работа с базата данни, която представлява отделен файл на файловата система. В този аспект, DuckDB прилича на популярната база данни SQLite [122]. DuckDB е предвидена за изпълняването на аналитични заявки, известни още като OLAP (Online Analytical Processing). При този тип заявки, най-често се използва сравнително малко подмножество от наличните колони, но за сметка на това се прави обработка на всички налични редове. За да се осигури добра производителност за този тип употреба, DuckDB използва техниката за векторизация на заявките, при която множество стойности биват изчитани и обработвани накуп, вместо една по една, като по този начин се амортизира сложността на итерацията [123].

За нашето решение, избрахме да използваме DuckDB (v0.4.0), защото основните заявки, които се изпълняват са аналитични по своята природа и обработват голямо количество от редове. Заявките за писане, и особено транзакционните такива, са редки. В допълнение, липсата на отделен сървър за базата данни улеснява инсталацията на софтуера за потенциалните му потребители.

4.1.3 Pandas

Pandas [124] е популярна библиотека за програмния език Python за анализ и манипулация на данни, създадена през 2008 година. Pandas предоставя DataFrame структура от данни, представляваща колекция от данни, представени в табличен вид. Pandas включва богат набор от функции за операции като анализ, трансформация, групиране, агрегация, преобразмерване, сливане и разделяне, четене/писане от и към различни видове файлови формати и др. Основните критични пътища са имплементирани на C и CPython, значително оптимизирайки производителността.

Повечето от операциите в програмното решение засягат обработката на голям обем от данни от структурирани данни, което прави използването на Pandas удачно. Също така, DuckDB предоставя интерфейс за извличане на резултати от заявки и за подаване на данни, при който се използват

Pandas DataFrame обекти. Разработчиците на DuckDB препоръчват използването на тези интерфейси, когато обемът на данните е по-голям, поради по-голямата им ефективност. Използвана е версия 1.4.2.

4.1.4 PyVCF3

PyVCF3 [125] е наследник на библиотеката PyVCF, адаптирано за съвместимост с версия 3 на програмния език Python. PyVCF е библиотека за синтактичен анализ на VCF файлове, която позволява прочитането на VCF файлове и зареждането им в Python класове и структури от данни. PyVCF се опитва да обработи „##INFO“ и „##FORMAT“ редовете, за да отгатне структурата на данните във входния файл. Ако това не е успешно, се обръща към дефинициите в VCF стандарта.

Програмното решение използва PyVCF3 (v1.0.3) за да прочете входните или междинните VCF файлове. Веднага след прочитането, данните се зареждат в Pandas DataFrame, чрез който биват обработвани.

4.1.5 Samtools и Tabix

Форматът SAM (Sequence Alignment/Map) е стандартен формат за съхраняване на голям брой подравнявания на нуклеотидни последователности. BAM е бинарен файл, представляващ компресирана версия на съответния му SAM файл. Samtools [126] софтуер за обработка на SAM и BAM файлове, включващ редица операции като сортиране, инспектиране, обединяване на файлове и др.

Tabix е програма за индексване на делимитирани с табулация файлове, съдържащи геномни позиции. След индексването на файл, Tabix позволява бързото намиране на редове, съдържащи информация за конкретни геномни региони. Важно необходимо условие за използването на Tabix за индексване на файл е файлът да бъде сортиран предварително спрямо геномната позиция.

4.1.6 Pysam

Pysam [127] е библиотека за Python, която позволява четенето и манипулирането на файлове в SAM и BAM формат. Pysam представлява тънка

обвивка около samtools и tabix и позволява лесното взаимодействие с тези инструменти от Python програми.

В програмното решение, Pysam (v0.19.1) се използва за компресиране и индексване на междинните VCF файлове, които програмата извлича след анотирането и филтрирането на входния VCF.

4.1.7 HGVS

Human Genome Variation Society (HGVS) е организация, занимаваща се с генетични варианти при хората. Организацията е създала стандартна номенклатура, също наречена HGVS, за описване на варианти на ДНК, РНК, протеини и други свързани с генетиката макромолекули. HGVS стандартът е широкоприет [128]. Общият формат за описване на вариант е „референция:описание“. Например, „NM_004006.2:c.4375C>T“ описва вариант на транскрипта NM_004006.2, при който в кодиращото ДНК цитозина от позиция 4375 е подменен от тимин.

Hgvs [129] е също така и името на библиотека за Python за манипулирането на варианти на поредици, използвайки HGVS номенклатурата. Hgvs позволява синтактичен анализ, форматиране, валидация и нормализиране на варианти на поредици от ниво геном, транскриптом или протеом.

В програмното решение се използва версия 1.5.2 на пакета за да се направи синтактичен анализ на HGVS номенклатурата, получена при анотацията посредством SnpEff, и да се изведе модифицирания протеин.

4.1.8 Bulma

Bulma е CSS framework, който предоставя готови компоненти и функционалности за стилизиране на уеб страници и разработване на потребителски интерфейси. Bulma се съдържа изцяло в един единствен CSS файл, който предоставя богата колекция от класове за стилизиране на HTML. Bulma предоставя и множество стандартни компоненти за изграждане на потребителски интерфейси като: менюта, контейнери за съобщения, навигационни ленти, модални прозорци, страниране, етикети и др. В програмното решение е използвана версия 0.9.4 на Bulma.

4.1.9 IGV

Геномният браузър IGV е разгледан по-подробно в секция 2.7.4. В програмното решение, IGV е интегриран в страницата за изследване на вариантите за определен ген. По този начин, потребителят има възможност да изследва визуално съвпаденията и разликите между геномната секвенция, полиморфизмите в гена и мРНК транскриптите. Всички тези обекти са представени като отделни информационни ленти в генетичния браузър.

Основните причини за избора на IGV пред други геномни браузъри са това, че може лесно да бъде интегриран в уеб приложението, поддържа VCF файлове, чрез които може да визуализира полиморфизми, лесно може да се конфигурира и предоставя програмен интерфейс, чрез който уеб приложението може да взаимодейства с него.

4.1.10 AlphaFold2

AlphaFold2 е програма, използваща алгоритми за дълбоко обучение за предсказването на третичната структура на протеини. Програмата е разгледана в повече детайли в секция 2.7.5. В дипломната работа, AlphaFold2 бе използвана за изследването на възможността за предсказване на триизмерната структура на вариант на протеин и визуализирането ѝ заедно със структурата на референтния протеин с цел сравнение. Причините за избор на AlphaFold2 бяха точността на резултатите ѝ и това, че е със свободен код и съответно публично достъпна.

4.2 Използвани и интегрирани генетични бази данни

За целите на дипломната работа бяха използвани редица онлайн бази данни за генетична информация, които са със свободен достъп.

4.2.1 HGNC

HGNC (HUGO Gene Name Nomenclature Committee) е организация отговорна за одобрението на уникални символи и имена за човешки гени, протеини, некодирани РНК гени и псевдогени, с цел улесняване на комуникацията между учените [130]. HGNC също предоставят публична база данни с пълната, одобрена от организацията, номенклатура. Тя е достъпна

на адрес <http://genenames.org> и също така предоставя REST API, чрез който информацията може да бъде достъпвана програматично. Освен номенклатурата, базата данни предоставя и идентификатори за артефакта на различни често използвани външни бази данни, като например Ensembl и UniProt.

Програмното решение използва REST API услугата на HGNC, за да извлича името и обща информация за гени, включително идентификатори от други бази данни. Тези идентификатори се използват за генериране на линкове, с които потребителят може да изследва въпросния ген в по-голяма дълбочина.

4.2.2 Ensembl

Ensembl е система за генериране и дистрибуция на геномна анотация, като например гени, генни варианти, генетична регулация и сравнителна геномика за множество видове сред гръбначните организми и други моделни организми. Ensembl интегрира експериментални и референтни данни от множество източници на едно място. Към 2020 година, Ensembl съдържа анотираните геноми на 227 различни вида [131]. Информацията, предоставяна от Ensembl, също така може да бъде извличана програматично чрез REST API.

Програмното решение използва REST API услугите, предоставяни от Ensembl, за да извлича референтната аминокиселинна поредица на протеините, които потребителят изследва.

4.2.3 NextProt

NextProt е платформа, която се стреми да дава цялостна и богата информация за човешките протеини. Разработва се от Швейцарския Институт по Биоинформатика. Използва както информация от експертно-модерираната база данни UniProtKB/Swiss-Prot, така и внимателно селектирана информация от експерименти с високопроизводително секвениране [132]. NextProt съдържа богата информация за функцията на протеините, биологичните пътища, в които те участват, както и молекулярните процеси, с които са свързани.

Програмното решение използва REST API услугата на NextProt за да извлича функциите, молекулярните процеси и биологичните пътища, с които се свързва даден протеин. Информацията се предоставя на потребителя, за да даде контекст за значението на протеина, който бива изследван.

4.2.4 HAGR

Human Ageing Genomic Resources (HAGR) е онлайн колекция от бази данни и инструменти, посветени на изследването на молекулярните и генетичните процеси, свързани със стареенето. HAGR включва бази данни за свързани със стареенето гени при хора и моделни организми, както и различни животински видове. Включва още бази данни за гени, свързани с клетъчното стареене, лекарства и химически съединения, свързани със стареенето, гени, свързани със удължаващи живота ефекти на различни диетични ограничения, а също и за асоциативни изследвания на човешката продължителност на живота. Всички бази данни в HAGR са курирани от експерти, а записите включват богат набор от връзки, както в рамките на HAGR, така и към външни източници на информация [66].

В текущата разработка, HAGR служи за извличане на списък от гени, потенциално асоциирани със стареенето. В страницата за обзор не определен ген е налична връзка към страницата за него в HAGR. Това позволява на потребителят да разбере повече за действието на гена, в контекста на стареенето, и да намери изследванията, които са установили връзка между двете.

5. Резултати

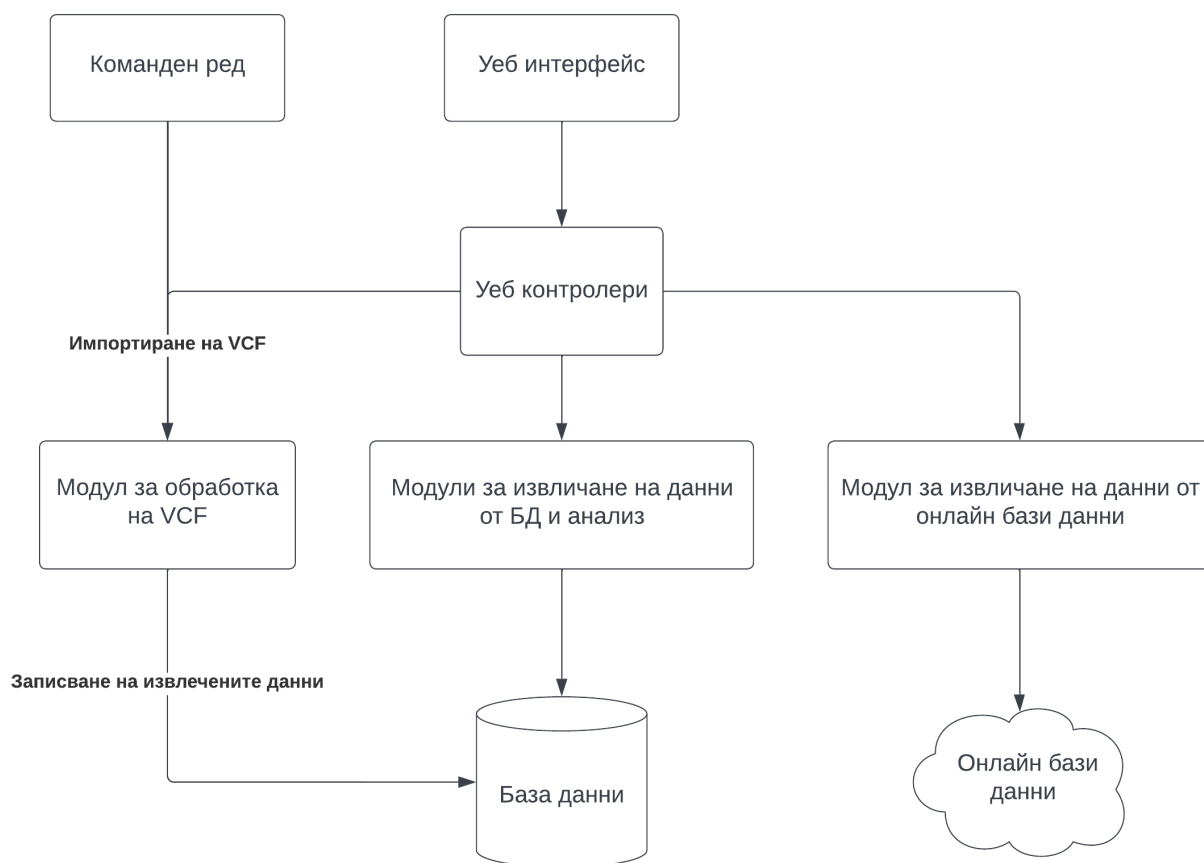
Въпреки огромното значение на процеса на стареене за индивида и обществото като цяло, науката все още не може да го обясни напълно, нито да намери достатъчно ефективни решения за справяне с негативните ефекти, които той предизвиква. Откритието на асоциации между определени генетични варианти и стареенето [133, 134, 135] означава, че бъдещите изследвания трябва да включват и изследване на генетични полиморфизми. Този тип изследвания генерират големи обеми от данни [142], но съществуващият биоинформатичен софтуер за целта изисква високо ниво на подготовка в областта на информационните технологии. Биолозите и генетиците, които искат да извлекат биологически значима информация от данните, получени от геномните секвенирания, често трябва да изграждат сложни системи от различни програми. Свързването им често включва писането на програмни скриптове.

С цел да облекчим работата при бъдещи изследвания на генетични полиморфизми, свързани със стареенето, и да направим такива изследвания достъпни, ние си поставихме за цел да разработим интегрирана биоинформатична система, която да позволява анализирането и интерпретирането на данни за генетични варианти посредством удобен, уеб-базиран, графичен интерфейс. Софтуерът е имплементиран на програмния език Python и е достъпен за свободно ползване без ограничения, като кодът му е отворен и достъпен на адрес <https://github.com/mzdravkov/polymorpheus>.

В процеса на разработка установихме, че същите принципи, които прилагаме за изследване на полиморфизми, свързани със стареенето, могат да бъдат приложени и върху други видове изследвания, като това изискваше съвсем малка генерализация на предвиденото софтуерно решение. В резултат, разработихме възможност за управление на различни множества от гени, като при подаване на VCF файл с генетични варианти, потребителят може да избере кое генно множество да бъде анализирано при обработката на полиморфизмите.

5.1 Софтуерна архитектура

Софтуерната архитектура на системата е разделена на четири слоя. Интерфейсен, включващ командния ред и уеб интерфейса с неговите страници, стилове и JavaScript код, който се изпълнява от браузъра на потребителя. Вторият слой включва контролерите, които обработват HTTP заявките, изпращани от уеб интерфейса. Третият слой извлича и обработва данни. В него се включват модулът за обработка на входни VCF файлове, модулите за извличане и анализ на данни от базата данни и модулът за извличане на данни от външни, онлайн бази данни. Четвъртият слой е базата данни, която съхранява информация за генетичните варианти, заредени от потребителя (Фигура 8).



Фигура 8: Диаграма на софтуерната архитектура на разработеното решение

5.2 База данни

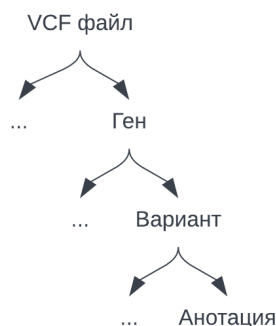
При изборът на тип на базата данни се спряхме на релационна база данни. Причините за това са няколко. Първата съществена причина е това, че структурата на данните е предварително ясна и промени по нея са малко вероятни. Това е така, тъй като структурата е базирана на информацията налична във VCF файловете и тази, предоставяна от софтуера за анотация (SnprEff). VCF форматът е дефиниран в общоприет стандарт [136], който не се променя често. Анотациите, предоставяни от SnprEff, също спазват определен стандарт [137]. Втората причина е, че релационните бази данни позволяват моделиране на базата спрямо концептуалния модел на данните, докато заявките, които ще се изпълняват, могат да имат по-малко значение [138]. Това свойство на релационните бази данни е подходящо за нашия случай, при който от самото начало е ясно с какви данни разполагаме, но не и как точно можем да ги анализираме. Релационната база данни ни позволява лесно да добавим нови заявки, без да са необходими промени по структурата на базата данни. Третата причина е, че не предвиждаме работа с толкова големи обеми от данни, че да изискват дистрибутиране на базата данни върху различни сървъри.

Измежду множеството релационни бази данни избрахме DuckDB [121]. Причините за това са свойството ѝ да се вгражда в друга програма, без да е необходим отделен сървър за управление на базата данни, което улеснява инсталацията, и поради приложимостта ѝ за изпълняване на аналитични заявки (виж секция 4.1.2).

Таблиците, използвани в програмното решение, могат да се разделят на две групи: такива, които са свързани с дефинирането на генни множества, и такива, които съхраняват информацията от анотирани VCF файлове с генетични варианти. За дефинирането на генни множества се използва таблица за множеството и втора таблица за членовете на множествата, като съществува 1-към-N релация между двете (Фигура 9). Информацията за всеки анотиран VCF файл с генетични варианти може да се представи като йерархична структура: файлът включва множество гени, всеки от които е засегнат от множество варианти, а всеки вариант може да притежава много анотации (Фигура 10). Съответно, тази йерархия е моделирана посредством четири таблици: файлове, гени, варианти и анотации. Всяка от тях съдържа външен ключ към предишната и по този начин образува N-към-1 релация с нея.



Фигура 9: Диаграма на структурата на базата данни



Фигура 10: Йерархично представяне на информацията от аотиран VCF файл

5.3 Управление на генни множества

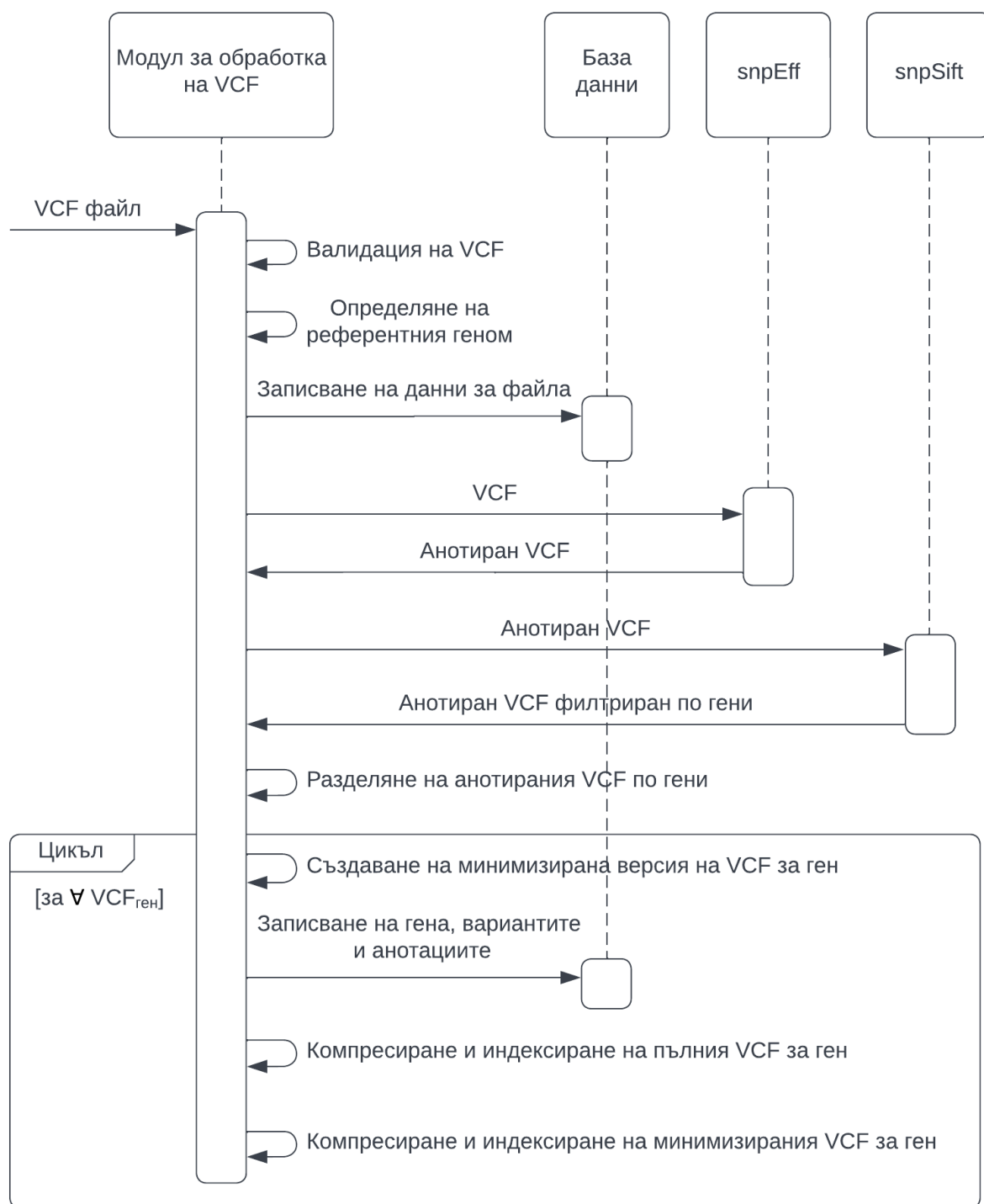
Възможността за управление на генетични множества е проста функционалност, която позволява на потребителя да създава, редактира и изтрива колекции от гени, които представляват цел за някакви изследвания. Всяко генно множество има име, описание и списък от HGNC символи на гени. Дефинирането на генно множество става посредством качване на файл, съдържащ един HGNC символ на ред. В последствие, когато качва VCF файл с генетични множества за обработка, потребителят избира спрямо кое генетично множество да бъде обработен VCF файла. Единствено варианти свързани с гените от това множество ще бъдат запазени в базата данни. Тази функционалност прави програмното решение по-генерализирано и позволява изследването на различни биологични процеси. Например, ако потребителят качи списък от гени, свързани с ракови заболявания, ще може да изследва полиморфизми за тяхната връзка с рака.

5.4 Обработка на VCF при импортиране

Началната точка при работа с разработения софтуер е качване на VCF файл, съдържащ генетични варианти. Това може да бъде направено както с уеб интерфейса, така и с интерфейсът, използващ командния ред (всъщност, импортирането и обработването на VCF е единствената операция, която командния ред може да извършва към момента). При качването на входен VCF файл за обработка, потребителят подава и генно множество, определящо кои гени да бъдат разгледани при обработката (виж секция 5.3).

Първата стъпка, която се извършва при обработката на входния VCF е проверка, дали същият файл вече е бил изследван. За целта се калкулира неговата SHA256 хеш сума. Тази сума се използва като главен ключ на таблицата с файлове в базата данни. Ако сумата вече съществува в базата данни, значи файлът вече е бил импортиран и обработката приключва. Ако файлът не е срещан досега, обработката продължава. Прави се валидация, която проверява, че файлът не използва твърде стара версия на VCF стандарта (поддържат се версии не по-малки от 4.0), и се извлича информация за това спрямо кой референтен геном е създаден файлът (Фигура 11).

Следва същинската обработка на входния VCF файл. Първо, външните програми SnpEff и SnpSift, съответно за анотация и филтриране, биват стартирани като отделни процеси. Двата процеса биват свързани посредством pipe оператор, така че анотираният VCF редове, които SnpEff връща, да се подадат директно като входни данни за SnpSift. По този начин SnpEff добавя анотация към редовете на входния VCF, която включва и HGNC символа на гена, с който дадения вариант е свързан. SnpSift филтрира редовете, които му се подават, като оставя само тези, които се отнасят за гени, включени в генното множество, което потребителят е избрал. Резултатът се чете от основната програма, която разглежда всеки ред за да определи за кой ген се отнася и го записва в нов частичен VCF файл, който съдържа само вариантите за дадения ген. Резултатът от тези стъпки е колекция от VCF файлове, всеки от които е анотиран и съдържа само генетичните варианти за един единствен ген. Следващата стъпка е обхождането на всеки от тези файлове, изчитането на данните в Pandas DataFrame обект, който преминава поредица трансформации, и записването на крайната информация в базата данни. Също така, за всеки от тези VCF файлове се създава минимизирана версия, която изключва вариантите определени като незначителни от SnpEff (по-конкретно, за които полето impact има стойност „MODIFIER“). Тази минимизирана версия по-късно се използва за зареждане на генетичните варианти в геномния браузър, като по този начин се осъществява оптимизация на производителността и намаляване на шума за потребителя. Минимизираният и пълният VCF файлове за всеки ген също така се компресират и индексират посредством tabix функционалността (виж секция 4.1.5), предоставяна от модула pysam (виж секция 4.1.6). Компресията служи за оптимизация на изискванията към хардуерните ресурси, а създаването на индексни файлове е необходимо за да могат по-късно файловете да се зареждат и визуализират от геномния браузър.



Фигура 11: Диаграма, показваща опростено описание на процеса по обработка на VCF файлове с генетични варианти.

5.5 Операции върху импортиран VCF

След като един входен VCF, съдържащ генетични варианти, бъде импортиран и обработката му приключи, потребителят може да изследва резултатите. В тази секция са представени основните функции, които програмното решение предоставя.

5.5.1 Списък на файлове

Началната страница предоставя списък с наличните файлове, които вече са импортирани. Потребителят може да избере дали да изследва данните за някой от наличните файлове, да стартира обработката на нов файл или да изтрие информацията за съществуващ файл (Фигура 13 от приложението).

5.5.2 Обзор на файл

Страницата за обзор на файл дава най-обща информация за вече обработен файл. Това включва референтния геном, спрямо който файлът е създаден, генното множество, спрямо което е изследван, броя гени засегнати от полиморфизми и броят анотации. По-детайлна разбивка е дадена в табличен вид, която показва за всеки ген броя варианти и техните анотации спрямо оценената им тежест (Фигура 14 от приложението).

5.5.3 Обзор на ген

Страницата за обзор на ген дава обща информация за гена и служи като отправна точка за изследването на различните варианти във файла, които го засягат. Страницата предоставя връзки към различни стандартни онлайн бази данни, където потребителят може да открие допълнителна информация за конкретния ген. Тези връзки включват базите данни Ensembl (виж секция 4.2.2), Entrez, HGNC (виж секция 4.2.1) и UniProt. Следва списък от богата анотация за протеина, кодиран от гена, включваща молекулярната функция, процесите и биологичните пътища, в които участва, каталитичната дейност и др (Фигура 15 от приложението). Налична е връзка към страницата, представяща всички варианти за гена.

Страницата включва и по-детайлна разбивка на анотираниите варианти за гена, представени в табличен вид. Таблицата показва броя на анотациите за варианти, групирани по оценка на тежестта и генетичен ефект. Оценката

на тежестта може да е четири варианта: модификатор, ниска, средна, висока. Възможните ефекти са разнообразни и включват например: синонимни мутации, придобиване на стоп кодон, мутации, изменящи смисъла или изместващи рамката, мутации в интрони и др (Фигура 16 от приложението). Всяка от стойностите в таблицата представлява връзка, при натискането на която, потребителят бива препратен към страницата за варианти, като се добавя филтър за конкретната стойност, така че потребителят да може да разгледа точно този вид варианти.

5.5.4 Варианти на ген

В страницата за варианти да ген потребителят има достъп до геномен браузър, чрез който може да изследва полиморфизмите, откривани в изследвания ген. При отварянето на страницата, браузърът автоматично се фокусира върху геномния регион, съдържащ списъка от варианти във VCF файла. Геномният браузър представя няколко различни информационни ленти. Първата лента показва генните варианти. Тъй като VCF файлът може да е за един експеримент, или множество експерименти, тази лента показва също така и комбинациите от изразени варианти за всеки от експериментите във VCF файла. Втората лента показва гените, като са обособени техните екзони и интрони. Третата лента показва транскриптите, които се кодират от даден ген, заедно с техните Ensembl идентификатори (Фигура 17 от приложението).

В страницата също е налична странирана таблица с всички варианти за гена. Таблицата представя началната и крайната точка на полиморфизма, референтната и алтернативната нуклеотидна поредица, типа и подтипа на полиморфизма (точкова мутация, вмъкване, изтриване и тн.). Налични са и контроли, с които могат да бъдат прилагани сложни филтри върху данните от таблицата (Фигура 18 от приложението).

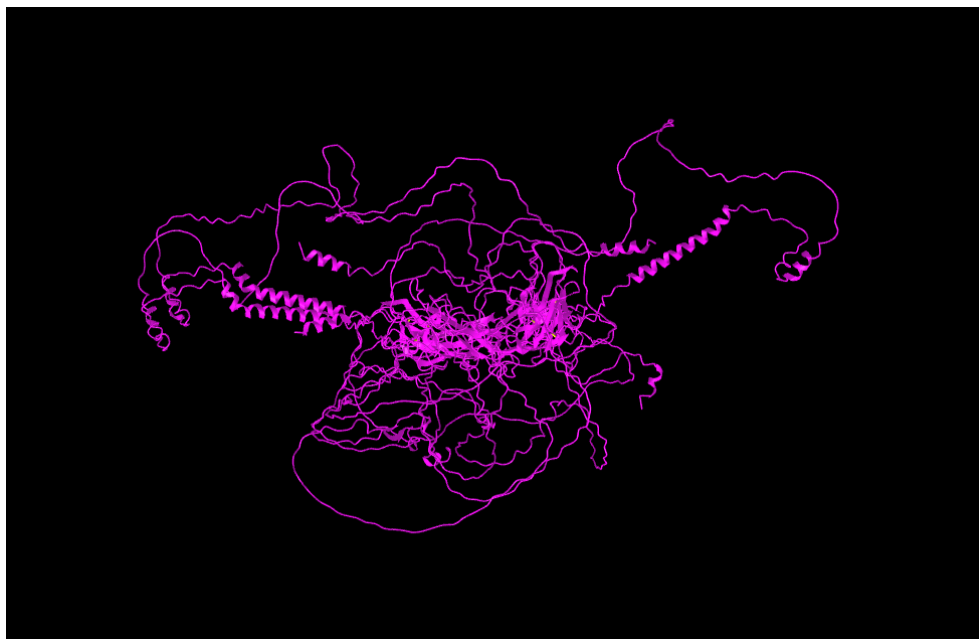
5.5.5 Засегнати транскрипти

За всеки генетичен вариант е достъпна страница със засегнатите от него транскрипти. Страницата предоставя таблица с Ensembl идентификатора на транскрипта, неговия тип (например протеинокодиращ, псевдоген и тн), ефекта, който полиморфизма оказва върху този транскрипт, тежестта на промяната и HGVS номенклатура (виж секция 4.1.7) на промяната на протеина, ако има такава. Потребителят също така може да сравни и

референтния и алтернативния протеин за този транскрипт (Фигура 19 от приложението).

5.5.6 Нагъване на протеини

Беше разгледана и възможността за интегриране на софтуер за нагъване на протеини на база протеиновата секвенция, както и софтуер за визуализация на получените триизмерни структури. Както става ясно от секция 5.5.5, системата ни има способността да изведе референтната и алтернативната протеинови секвенции. Тези секвенции могат да бъдат подадени като входни данни на програма за нагъване на протеини. За целта се спряхме на програмата AlphaFold, която към днешна дата предлага най-висока точност на резултатите (виж секция 2.7.5). Макар да успяхме да използваме AlphaFold2 за предсказване на третичната структура на протеини (Фигура 12), в крайна сметка заключихме, че интегрирането ѝ в софтуерното решение не е достатъчно практично на този етап. Причините за това са сравнително трудната инсталация, необходимостта от сваляне на огромни бази данни (дори опцията използваща редуцирана база данни изисква над 600GB бази данни) и голямата продължителност на процеса по нагъване на протеини. На компютърна конфигурация с процесор CPU Ryzen 7 5800X (AM4/4,7GHz/36MB), 32 GB RAM и HDD със скорост 175 MB/s, нагъването на неголям протеин с 600 аминокиселини отнема около 100 минути.



Фигура 12: Пример за предсказаната триизмерна структура на протеина GHR (P10912), получена чрез AlphaFold2.

6. Дискусия

Дипломната работа установява наличието на богата екосистема от различни инструменти и биоинформатични програми, които покриват различните аспекти от обработката и анализа на генетични варианти. Макар да не предоставя нови възможности, които досега са липсвали изцяло, разработеният софтуер дава възможност за изключително лесно и бързо изследване на данните, без да изисква никакви специализирани познания по информатика и програмиране. В контраст, вече съществуващите решения най-често предлагат интерфейс, използващ командния ред на операционната система, а дори елементарен анализ изисква комбинирането на няколко различни програми. Онези алтернативи, които предлагат по-удобен графичен потребителски интерфейс, като Galaxy (виж секция 2.7.6) и Cutevariant (виж секция 2.7.3), също не са твърде лесни за използване. Galaxy предоставя стотици функции, използвайки разнообразни и не съвсем интегрирани инструменти, като потребителят трябва да е запознат с ролята и параметрите на различните инструменти. Друга алтернатива е софтуерът Cutevariant, който обаче не покрива пълния цикъл от обработката на един VCF файл и изисква потребителят собственоръчно да го аотира преди да го зареди в програмата. Също така, за да изследва и анализира данните за генетичните варианти чрез Cutevariant, потребителят използва заявки, написани на подобен на SQL декларативен програмен език. Резултатите са представен в табличен вид, съответстващ на колоните от VCF файла и анотациите, добавени от SnpEff или VEP, като липсват вграден геномен браузър или връзки към външни генетични бази данни, чрез които потребителят може по-лесно да се ориентира в големия обем данни и да разбере значението им.

Разработената интегрирана система в настоящата дипломна работа прави изследването на генетични варианти по-достъпно и удобно, но е лишена от гъвкавостта и голямото разнообразие от възможности, което съществуващите алтернативи предлагат. Това я прави подходящ избор за потребители, които нямат добри информатични познания, или за такива, които имат, но искат да направят първоначално обследване на данните, преди да изградят

по-специализирана система за биоинформатична обработка. По този начин, разработката ни не се конкурира пряко със съществуващите инструменти, ами заема определена ниша, която, доколкото ни е известно, досега не е била запълнена от друго решение.

Разработената система надскача поставените цели, като дава възможност за изследване на генетични варианти свързани с произволни биологични функции, а не само на такива свързани с процеса на стареене. Това е възможно благодарение на функционалността за управление на генетични множества, която позволява на потребителя да анализира генетичните варианти спрямо определен от него списък от гени. Например, за да проведе изследване в областта на онкологията, потребителят може да подготви и използва множество от гени, свързани с появата на рак, което да използва при анализа на своите VCF файлове.

Разбира се, като бъдещи перспективи пред нас остава разработването на потребителски интерфейс, използващ командния ред, чрез който системата да може да бъде програматично свързвана в по-мощни биоинформатични системи. Също така, макар да бе разгледана възможността за интегрирането на програма за предсказване на триизмерната структура на протеини и на такава за визуализирането на тези структури в рамките софтуерното решение, това в крайна сметка се оказа непрактично и не бе осъществено. Причините за това са изцяло технически и включват сравнително трудната инсталация, високите системни изисквания и недостатъчно висока производителност на съществуващите решения. С напредването на методите и технологиите в областта на определянето на триизмерната структура на протеините, тези ограничения могат да бъдат разрешени.

Бъдещи разработки могат да допринесат към развитието на софтуерното решение в редица различни направления. Добавянето на възможност за изследване на епигенетични изменения е едно от тях. Смята се, че съществува значителна връзка между стареенето и нивата на ДНК метилирането [139], което е един от важните епигенетични процеси и белези на стареенето. VCF файловете, които са основните входни данни за разработената система, се използват и за отчитането на нивата на ДНК метилиране при интегриране на резултати от бисулфитно секвениране на целия геном [140, 141]. Разширяването на възможностите на системата, така че да може да обработва и такива VCF файлове, би й дало значително предимство.

Друго възможно бъдещо развитие на изградената системата е добавянето на функционалности за популационна генетика. VCF файловете могат да съдържат информация за един или много индивиди. Би било полезно ако системата може да идентифицира файловете, съдържащи данни за генетични варианти сред група индивиди и да предоставя набор от функционалности, даващи различни статистики и анализи от областта на популационната генетика. В публичното интернет пространство вече съществуват свободно достъпни голямо количество данни за генетични варианти, присъщи за различни етнически групи, като тези събрани от проекта „1000 генома“ [142]. Добавянето на възможности за изследване на въпроси от популационната генетика към софтуера би позволило използването му за нови цели. Например, изследователите биха могли да го използват за да анализират тези богати източници на информация и да търсят гени и полиморфизми, влияещи на стареенето, или да откриват подходящи цели за генни терапии. Проблемът с намиране на подходящи цели за генни терапии е от много голямо значение не само за геронтологията, но и за други области. Смята се, че това е един от основните проблеми за разработване на генни терапии за лечение на рак [143].

В момента разработеният софтуер е подходящ за локално използване на компютъра на потребителя. Но понеже е изграден като приложение, използващо клиент-сървър архитектура, би било лесно да се адаптира така, че да може да се инсталира на централен сървър и да бъде достъпвано от потребителите през интернет мрежата, без да им се налага да го инсталират локално. За целта биха били необходими няколко подобрения на софтуера. Първото е въвеждането на форма на автентикация и асоцииране на ресурсите към потребителски акаунт, така че всеки потребител да има достъп единствено до своите собствени данни. Това е особено важно, защото генетичните данни, които се анализират, ако не идват от публична база данни, са изключително чувствителна лична информация и позволяването на неоторизиран достъп към тях би било сериозен пробив в сигурността. Второто нужно подобрение е разработването на стратегия за почистването на данните след определен период, тъй като често файловете с генетични варианти имат размер в порядъка на гигабайти и при наличието на повече потребители би било трудно да бъдат съхранявани за постоянно. Третото необходимо подобрение е да се позволи конкурентния запис на данни в базата, тъй като текущото решение използва mutex за четене и писане (read-write mutex), който позволява конкурентно четене, но не позволява никакви други операции докато една нишка записва данни.

Софтуерното решение засега може да работи единствено с генетични варианти в човешкия геном (по-конкретно, с референтните геноми GRCh37 и GRCh38). Това ограничение може да бъде превъзможнато в бъдещи подобрения на системата, като техническите трудности за това са сравнително малки. Това ще позволи да се използва пълния потенциал на програмата за анотация на генетични варианти SnpEff и да могат да се изследват варианти за всеки геном, който тя поддържа. Към момента SnpEff поддържа над 38 хиляди генома за множество различни видове [144]. Това би било полезно както в областта на изследването на стареенето, където повечето проучвания изучават моделни организми [85], така и в други области, изучаващи други видове.

Разработеното софтуерно решение предоставя възможности за лесен и удобен анализ на генетични варианти, по начин, който го прави по-достъпен от вече съществуващите решения. То е приложимо както в областта на изследването на стареенето и свързаните с него заболявания, така и във всяка друга област на биологията, в която генетичните варианти могат да имат значение. Предложените насоки за бъдещи подобрения биха подобрили достъпността и разширили приложимостта на софтуера в допълнителни сфери на изследователската дейност. Разработката ни е със свободен код и може да бъде използвана и подобрявана от всеки. Надяваме се да бъде от полза на научната общност.

7. Изводи

1. Проектирана и изградена е софтуерна система, която дава възможност за изследване на генетични варианти както в областта на геронтологията, така и в други сфери на биологията:
 - 1.1 Системата се интегрира с програма за аотиране на генетични варианти и дава възможност за автоматична анотация на входни VCF файлове.
 - 1.2 Системата предоставя уеб-базиран, графичен потребителски интерфейс с възможност за зареждане на входни данни и богат набор от страници за изучаване на обработената информация за генетичните варианти на различни нива на детайлност.
 - 1.3 Тя позволява извличане на информация само за гените, които представляват интерес за потребителя, и я съхранява в база данни за по-нататъшен анализ.
 - 1.4 Включва геномен браузър, който дава пространствена представа за местоположенията на полиморфизмите спрямо различни генетични артефакти.
 - 1.5 Софтуерът позволява визуализация на промените в полипептидната верига, получени в резултат от полиморфизмите в кодиращата ДНК.
2. Направени са предварителни стъпки за интегриране на софтуер за определяне и визуализация на триизмерната пространствена структура на протеини, чрез който системата да дава възможност за анализ на ефекта на генетичните варианти върху кодиращия протеин.

Библиография

- [1] R. Arking. *Biology of Aging: Observations and Principles*, page 11. Oxford University Press, 2006.
- [2] K. George and M. S. Kamath. Fertility and age. *J Hum Reprod Sci*, 3(3):121–123, Sep 2010.
- [3] R. P. Spencer. Organ/body weight loss with aging: evidence for co-ordinated involution. *Med Hypotheses*, 46(2):59–62, Feb 1996.
- [4] K. Feder, D. Michaud, P. Ramage-Morin, J. McNamee, and Y. Beauregard. Prevalence of hearing loss among Canadians aged 20 to 79: Audiometric results from the 2012/2013 Canadian Health Measures Survey. *Health Rep*, 26(7):18–25, Jul 2015.
- [5] E. B. Larson, K. Yaffe, and K. M. Langa. New insights into the dementia epidemic. *N Engl J Med*, 369(24):2275–2277, Dec 2013.
- [6] Sahdeo Prasad, Bokyoung Sung, and Bharat B. Aggarwal. Age-associated chronic diseases require age-old medicine: Role of chronic inflammation. *Preventive Medicine*, 54:S29–S37, 2012. Dietary Nutraceuticals and Age Management Medicine.
- [7] AGS Panel on Persistent Pain in Older Persons. The management of persistent pain in older persons. *Journal of the American Geriatrics Society*, 50(6 Suppl):S205–224, Jun 2002.
- [8] Jose Viña, Consuelo Borrás, and Jaime Miquel. Theories of ageing. *IUBMB life*, 59(4-5):249–254, 2007.
- [9] V. Curwen, E. Eyraas, T. D. Andrews, L. Clarke, E. Mongin, S. M. Searle, and M. Clamp. The Ensembl automatic gene annotation system. *Genome Res*, 14(5):942–950, May 2004.

- [10] N. Khansari, Y. Shakiba, and M. Mahmoudi. Chronic inflammation and oxidative stress as a major cause of age-related diseases and cancer. *Recent Pat Inflamm Allergy Drug Discov*, 3(1):73–80, Jan 2009.
- [11] Kuzhuvelil B. Harikumar and Bharat B. Aggarwal. Resveratrol: A multitargeted agent for age-associated chronic diseases. *Cell Cycle*, 7(8):1020–1035, 2008. PMID: 18414053.
- [12] Richard Zijdeman and Filipa Ribeira da Silva. Life Expectancy at Birth (Total). 2015.
- [13] W. Lutz, W. Sanderson, and S. Scherbov. The coming acceleration of global population ageing. *Nature*, 451(7179):716–719, Feb 2008.
- [14] World Health Organization. *World report on ageing and health*. World Health Organization, 2015.
- [15] World Health Organization. Life expectancy and healthy life expectancy - data by country. *Published online*, 2020.
- [16] Winston Wong. Economic burden of alzheimer disease and managed care considerations. *The American journal of managed care*, 26(8 Suppl):S177–S183, August 2020.
- [17] C. Bommer, V. Sagalova, E. Heesemann, J. Manne-Goehler, R. Atun, T. Bärnighausen, J. Davies, and S. Vollmer. Global Economic Burden of Diabetes in Adults: Projections From 2015 to 2030. *Diabetes Care*, 41(5):963–970, 05 2018.
- [18] G. Houlihan, S. Arangundy-Franklin, and P. Holliger. Exploring the Chemistry of Genetic Information Storage and Propagation through Polymerase Engineering. *Acc Chem Res*, 50(4):1079–1087, 04 2017.
- [19] William S. Klug, Michael R. Cummings, Spencer Charlotte A., and Michael A. Palladino. *Concepts of Genetics: Pearson New International Edition*, pages 412–420. 2014.
- [20] GARRETT A. SOUKUP and RONALD R. BREAKER. Relationship between internucleotide linkage geometry and the stability of rna. *RNA*, 5(10):1308–1325, 1999.
- [21] Melania E. Cristescu. Can environmental rna revolutionize biodiversity science? *Trends in Ecology and Evolution*, 34(8):694–697, 2019.

- [22] Francis Crick. Central dogma of molecular biology. *Nature*, 227(5258):561–563, 1970.
- [23] R. J. Sims, S. S. Mandal, and D. Reinberg. Recent highlights of RNA-polymerase-II-mediated transcription. *Curr Opin Cell Biol*, 16(3):263–271, Jun 2004.
- [24] Stefan Stamm, Shani Ben-Ari, Ilona Rafalska, Yesheng Tang, Zhaiyi Zhang, Debra Toiber, T.A. Thanaraj, and Hermona Soreq. Function of alternative splicing. *Gene*, 344:1–20, 2005.
- [25] B. Modrek and C. Lee. A genomic view of alternative splicing. *Nat Genet*, 30(1):13–19, Jan 2002.
- [26] Jan Peter Siebrasse, Tim Kaminski, and Ulrich Kubitscheck. Nuclear export of single native mrna molecules observed by light sheet fluorescence microscopy. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(24):9426–9431, 2012.
- [27] William S. Klug, Michael R. Cummings, Spencer Charlotte A., and Michael A. Palladino. *Concepts of Genetics: Pearson New International Edition*, pages 301–310. 2014.
- [28] Jeremy M Berg, John L Tymoczko, and Lubert Stryer. Biochemistry, ; w. h. *New York: Freeman and Company: New York*, 2002.
- [29] A. G. Hinnebusch. Translational regulation of GCN4 and the general amino acid control of yeast. *Annu Rev Microbiol*, 59:407–450, 2005.
- [30] Stuart K. Calderwood, Salamatu S. Mambula, Philip J. Gray, and Jimmy R. Theriault. Extracellular heat shock proteins in cell signaling. *FEBS Letters*, 581(19):3689–3694, 2007. Cellular Stress.
- [31] H. P. Erickson. Evolution of the cytoskeleton. *Bioessays*, 29(7):668–677, Jul 2007.
- [32] J. B. Wittenberg. On optima: the case of myoglobin-facilitated oxygen diffusion. *Gene*, 398(1-2):156–161, Aug 2007.
- [33] Mauno Vihinen. Functional effects of protein variants. *Biochimie*, 180:104–120, 2021.
- [34] Zhores A Medvedev. An attempt at a rational classification of theories of ageing. *Biological Reviews*, 65(3):375–398, 1990.

- [35] C. López-Otín, M. A. Blasco, L. Partridge, M. Serrano, and G. Kroemer. The hallmarks of aging. *Cell*, 153(6):1194–1217, Jun 2013.
- [36] David Wang, Deborah A. Kreutzer, and John M. Essigmann. Mutagenicity and repair of oxidative dna damage: insights from studies using defined lesions. *Mutation Research/Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis*, 400(1):99–115, 1998.
- [37] L. H. Breimer. Ionizing radiation-induced mutagenesis. *Br J Cancer*, 57(1):6–18, Jan 1988.
- [38] Mark T. Mc Auley, Alvaro Martinez Guimera, David Hodgson, Neil Mcdonald, Kathleen M. Mooney, Amy E. Morgan, and Carole J. Proctor. Modelling the molecular mechanisms of aging. *Bioscience Reports*, 37(1), 02 2017. BSR20160177.
- [39] J. Vijg and Y. Suh. Genome instability and aging. *Annu Rev Physiol*, 75:645–668, 2013.
- [40] Jack D Griffith, Laurey Comeau, Soraya Rosenfield, Rachel M Stansel, Alessandro Bianchi, Heidi Moss, and Titia de Lange. Mammalian telomeres end in a large duplex loop. *Cell*, 97(4):503–514, 1999.
- [41] Alexander K. Koliada, Dmitry S. Krasnenkov, and Alexander M. Vaiserman. Telomeric aging: mitotic clock or stress indicator? *Frontiers in Genetics*, 6, 2015.
- [42] Keiko Muraki, Kristine Nyhan, Limei Han, and John P Murnane. Mechanisms of telomere loss and their consequences for chromosome instability. *Frontiers in oncology*, 2:135, 2012.
- [43] Kurt Whitemore, Elsa Vera, Eva Martínez-Nevado, Carola Sanpera, and Maria A. Blasco. Telomere shortening rate predicts species life span. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(30):15122–15127, 2019.
- [44] Leonard Hayflick and Paul S Moorhead. The serial cultivation of human diploid cell strains. *Experimental cell research*, 25(3):585–621, 1961.
- [45] R. Di Micco, V. Krizhanovsky, D. Baker, and F. d’Adda di Fagagna. Cellular senescence in ageing: from mechanisms to therapeutic opportunities. *Nat Rev Mol Cell Biol*, 22(2):75–95, 02 2021.

- [46] J. C. Jeyapalan and J. M. Sedivy. Cellular senescence and organismal aging. *Mech Ageing Dev*, 129(7-8):467–474, 2008.
- [47] William R Jeck, Alex P Siebold, and Norman E Sharpless. A meta-analysis of gwas and age-associated diseases. *Aging cell*, 11(5):727–731, 2012.
- [48] C. Dupont, D. R. Armant, and C. A. Brenner. Epigenetics: definition, mechanisms and clinical perspective. *Semin Reprod Med*, 27(5):351–357, Sep 2009.
- [49] Patrizia D’Aquila, Giuseppina Rose, Dina Bellizzi, and Giuseppe Passarino. Epigenetics and aging. *Maturitas*, 74(2):130–136, 2013.
- [50] K. A. Aitbaev, I. T. Murkamilov, and V. V. Fomin. Molecular mechanisms of aging: the role of oxidative stress and epigenetic modifications. *Adv Gerontol*, 32(1-2):20–28, 2019.
- [51] M. Jung and G. P. Pfeifer. Aging and DNA methylation. *BMC Biol*, 13:7, Jan 2015.
- [52] Steve Horvath. Dna methylation age of human tissues and cell types. *Genome biology*, 14(10):1–20, 2013.
- [53] Chandrima Das and Jessica K. Tyler. Histone exchange and histone modifications during transcription and aging. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Gene Regulatory Mechanisms*, 1819(3):332–342, 2012. Histone chaperones and Chromatin Assembly.
- [54] Sun-Ju Yi and Kyunghwan Kim. New insights into the role of histone changes in aging. *International Journal of Molecular Sciences*, 21(21), 2020.
- [55] Susmita Kaushik and Ana Maria Cuervo. Proteostasis and aging. *Nature medicine*, 21(12):1406–1415, 2015.
- [56] L. Fontana, L. Partridge, and V. D. Longo. Extending healthy life span—from yeast to humans. *Science*, 328(5976):321–326, Apr 2010.
- [57] A. Trifunovic and N. G. Larsson. Mitochondrial dysfunction as a cause of ageing. *J Intern Med*, 263(2):167–178, Feb 2008.
- [58] Gregory C Kujoth, Asimina Hiona, Thomas D Pugh, Shinichi Someya, Ken Panzer, Stephanie E Wohlgemuth, Tim Hofer, AY Seo, R Sullivan,

- WA Jobling, et al. Mitochondrial dna mutations, oxidative stress, and apoptosis in mammalian aging. *Science*, 309(5733):481–484, 2005.
- [59] Marc Vermulst, Jonathan Wanagat, Gregory C Kujoth, Jason H Bielas, Peter S Rabinovitch, Tomas A Prolla, and Lawrence A Loeb. Dna deletions and clonal mutations drive premature aging in mitochondrial mutator mice. *Nature genetics*, 40(4):392–394, 2008.
- [60] Y Ruzankina and EJ Brown. Relationships between stem cell exhaustion, tumour suppression and ageing. *British journal of cancer*, 97(9):1189–1193, 2007.
- [61] Miren Revuelta and Ander Matheu. Autophagy in stem cell aging. *Aging cell*, 16(5):912–915, 2017.
- [62] Cyril Lager, Eugen Ursu, Anaïs Equey, Roberto A Avelar, Angela O Pisco, Robi Tacutu, and João Pedro de Magalhães. scagecom: a murine atlas of age-related changes in intercellular communication inferred with the package scdiffcom. *BioRxiv*, 2021.
- [63] Liang Liu, Serene Lai, Lucy G. Andrews, and Trygve O. Tollefsbol. Genetic and epigenetic modulation of telomerase activity in development and disease. *Gene*, 340(1):1–10, 2004.
- [64] Zelin Jin and Yun Liu. Dna methylation in human diseases. *Genes and Diseases*, 5(1):1–8, 2018.
- [65] Kaoru Tominaga, Abdullah Olgun, James R. Smith, and Olivia M. Pereira-Smith. Genetics of cellular senescence. *Mechanisms of Ageing and Development*, 123(8):927–936, 2002.
- [66] R. Tacutu, D. Thornton, E. Johnson, A. Budovsky, D. Barardo, T. Craig, E. Diana, G. Lehmann, D. Toren, J. Wang, V. E. Fraifeld, and J. P. de Magalhães. Human Ageing Genomic Resources: new and updated databases. *Nucleic Acids Res*, 46(D1):D1083–D1090, 01 2018.
- [67] Taiping Chen and Stéphane Richard. Structure-function analysis of qk1: a lethal point mutation in mouse *quaking* prevents homodimerization. *Molecular and Cellular Biology*, 18(8):4863–4871, 1998.
- [68] H. Zou, L. X. Wu, L. Tan, F. F. Shang, and H. H. Zhou. Significance of Single-Nucleotide Variants in Long Intergenic Non-protein Coding RNAs. *Front Cell Dev Biol*, 8:347, 2020.

- [69] A. Auton, L. D. Brooks, R. M. Durbin, E. P. Garrison, H. M. Kang, J. O. Korbel, J. L. Marchini, S. McCarthy, G. A. McVean, and colleagues. A global reference for human genetic variation. *Nature*, 526(7571):68–74, Oct 2015.
- [70] C. Kimchi-Sarfaty, J. M. Oh, I. W. Kim, Z. E. Sauna, A. M. Calcagno, S. V. Ambudkar, and M. M. Gottesman. A "silent" polymorphism in the MDR1 gene changes substrate specificity. *Science*, 315(5811):525–528, Jan 2007.
- [71] Laure Bidou, Valérie Allamand, Jean-Pierre Rousset, and Olivier Namy. Sense from nonsense: therapies for premature stop codon diseases. *Trends in Molecular Medicine*, 18(11):679–688, 2012.
- [72] Joris Deelen, Marian Beekman, Hae-Won Uh, Quinta Helmer, Maris Kuningas, Lene Christiansen, Dennis Kremer, Ruud van der Breggen, H. Eka D. Suchiman, Nico Lakenberg, Erik B. van den Akker, Willemijn M. Passtoors, Henning Tiemeier, Diana van Heemst, Anton J. de Craen, Fernando Rivadeneira, Eco J de Geus, Markus Perola, Frans J. van der Ouderaa, David A. Gunn, Dorret I. Boomsma, André G. Uitterlinden, Kaare Christensen, Cornelia M. van Duijn, Bastiaan T. Heijmans, Jeanine J. Houwing-Duistermaat, Rudi G. J. Westendorp, and P. Eline Slagboom. Genome-wide association study identifies a single major locus contributing to survival into old age; the apoe locus revisited. *Aging Cell*, 10(4):686–698, 2011.
- [73] F. Lu, H. Guan, B. Gong, X. Liu, R. Zhu, Y. Wang, J. Qian, T. Zhou, X. Lan, P. Wang, Y. Lin, S. Ma, H. Lin, X. Zhu, R. Chen, X. Zhu, Y. Shi, and Z. Yang. Genetic variants in PVRL2-TOMM40-APOE region are associated with human longevity in a Han Chinese population. *PLoS One*, 9(6):e99580, 2014.
- [74] J. M. Mullaney, R. E. Mills, W. S. Pittard, and S. E. Devine. Small insertions and deletions (INDELs) in human genomes. *Hum Mol Genet*, 19(R2):R131–136, Oct 2010.
- [75] J. Quan, Y. Cao, H. Bai, L. Dong, Z. Li, Y. Zhu, L. Zhu, Z. Dong, and D. Li. Identifying the genome-wide sequence variations and developing new molecular markers for genetics research by re-sequencing a Landrace cultivar of foxtail millet. *PLoS One*, 8(9):e73514, 2013.

- [76] Vivien Marx. The big challenges of big data : as they grapple with increasingly large data sets, biologists and computer scientists uncork new bottlenecks. *Nature*, pages 255–260, 2013.
- [77] EMBL-EBI. European bioinformatics institute embl-ebi annual report 2020. 2021.
- [78] Nicholas M Luscombe, Dov Greenbaum, and Mark Gerstein. What is bioinformatics? an introduction and overview. *Yearbook of medical informatics*, 10(01):83–100, 2001.
- [79] Gavin R Oliver, Steven N Hart, and Eric W Klee. Bioinformatics for Clinical Next Generation Sequencing. *Clinical Chemistry*, 61(1):124–135, 01 2015.
- [80] Bronwen L. Aken, Sarah Ayling, Daniel Barrell, Laura Clarke, Valery Curwen, Susan Fairley, Julio Fernandez Banet, Konstantinos Billis, Carlos García Girón, Thibaut Hourlier, Kevin Howe, Andreas Kähäri, Felix Kokocinski, Fergal J. Martin, Daniel N. Murphy, Rishi Nag, Magali Ruffier, Michael Schuster, Y. Amy Tang, Jan-Hinnerk Vogel, Simon White, Amonida Zadissa, Paul Flicek, and Stephen M. J. Searle. The Ensembl gene annotation system. *Database*, 2016, 06 2016. baw093.
- [81] Jason H. Moore, Folkert W. Asselbergs, and Scott M. Williams. Bioinformatics challenges for genome-wide association studies. *Bioinformatics*, 26(4):445–455, 01 2010.
- [82] John Jumper, Richard Evans, Alexander Pritzel, Tim Green, Michael Figurnov, Olaf Ronneberger, Kathryn Tunyasuvunakool, Russ Bates, Augustin Žídek, Anna Potapenko, Alex Bridgland, Clemens Meyer, Simon A. A. Kohl, Andrew J. Ballard, Andrew Cowie, Bernardino Romera-Paredes, Stanislav Nikolov, Rishub Jain, Jonas Adler, Trevor Back, Stig Petersen, David Reiman, Ellen Clancy, Michal Zielinski, Martin Steinegger, Michalina Pacholska, Tamas Berghammer, David Silver, Oriol Vinyals, Andrew W. Senior, Koray Kavukcuoglu, Pushmeet Kohli, and Demis Hassabis. Applying and improving alphafold at casp14. *Proteins: Structure, Function, and Bioinformatics*, 89(12):1711–1721, 2021.
- [83] David B Searls. Using bioinformatics in gene and drug discovery. *Drug Discovery Today*, 5(4):135–143, 2000.
- [84] Wellison Jarles da Silva Diniz and Fernanda Canduri. Bioinformatics: an overview and its applications. *Genet Mol Res*, 16(1):10–4238, 2017.

- [85] João Pedro de Magalhães and Olivier Toussaint. How bioinformatics can help reverse engineer human aging. *Ageing Research Reviews*, 3(2):125–141, 2004.
- [86] P. Danecek, A. Auton, G. Abecasis, C. A. Albers, E. Banks, M. A. DePristo, and et al Handsaker. The variant call format and VCFtools. *Bioinformatics*, 27(15):2156–2158, Aug 2011.
- [87] H. Yang and K. Wang. Genomic variant annotation and prioritization with ANNOVAR and wANNOVAR. *Nat Protoc*, 10(10):1556–1566, Oct 2015.
- [88] D. J. McCarthy, P. Humburg, A. Kanapin, M. A. Rivas, K. Gaulton, J. B. Cazier, and P. Donnelly. Choice of transcripts and software has a large effect on variant annotation. *Genome Med*, 6(3):26, 2014.
- [89] P. Cingolani, A. Platts, M. Coon, T. Nguyen, L. Wang, S.J. Land, X. Lu, and D.M. Ruden. A program for annotating and predicting the effects of single nucleotide polymorphisms, snpeff: Snps in the genome of drosophila melanogaster strain w1118; iso-2; iso-3. *Fly*, 6(2):80–92, 2012.
- [90] Herbert Schildt. *The complete reference Java*, pages 9–10. 2020.
- [91] W. McLaren, L. Gil, S. E. Hunt, H. S. Riat, G. R. Ritchie, A. Thormann, P. Flicek, and F. Cunningham. The Ensembl Variant Effect Predictor. *Genome Biol*, 17(1):122, 06 2016.
- [92] Sarah E. Hunt, Benjamin Moore, Ridwan M. Amode, Irina M. Armean, Diana Lemos, Aleena Mushtaq, Andrew Parton, Helen Schuilenburg, Michał Szpak, Anja Thormann, Emily Perry, Stephen J. Trevanion, Paul Flicek, Andrew D. Yates, and Fiona Cunningham. Annotating and prioritizing genomic variants using the ensembl variant effect predictor—a tutorial. *Human Mutation*, 43(8):986–997, 2022.
- [93] Kai Wang, Mingyao Li, and Hakon Hakonarson. ANNOVAR: functional annotation of genetic variants from high-throughput sequencing data. *Nucleic Acids Research*, 38(16):e164–e164, 07 2010.
- [94] P. Cingolani, V. M. Patel, M. Coon, T. Nguyen, S. J. Land, D. M. Ruden, and X. Lu. Using *Drosophila melanogaster* as a Model for Genotoxic Chemical Mutational Studies with a New Program, SnpSift. *Front Genet*, 3:35, 2012.

- [95] Petr Danecek, James K Bonfield, Jennifer Liddle, John Marshall, Valeriu Ohan, Martin O Pollard, Andrew Whitwham, Thomas Keane, Shane A McCarthy, Robert M Davies, and Heng Li. Twelve years of SAMtools and BCFtools. *GigaScience*, 10(2), 02 2021. giab008.
- [96] Sacha Schutz, Charles Monod-Broca, Lucas Bourneuf, Pierre Marijon, and Tristan Montier. Cutevariant: a standalone GUI-based desktop application to explore genetic variations from an annotated VCF file. *Bioinformatics Advances*, 2(1), 11 2021. vbab028.
- [97] Zachary D. Stephens, Skylar Y. Lee, Faraz Faghri, Roy H. Campbell, Chengxiang Zhai, Miles J. Efron, Ravishankar Iyer, Michael C. Schatz, Saurabh Sinha, and Gene E. Robinson. Big data: Astronomical or genetical? *PLOS Biology*, 13(7):1–11, 07 2015.
- [98] S. C. Schuster. Next-generation sequencing transforms today’s biology. *Nat Methods*, 5(1):16–18, Jan 2008.
- [99] Supratim Mukherjee, Dimitri Stamatis, Jon Bertsch, Galina Ovchinnikova, Jagadish Chandrabose Sundaramurthi, Janey Lee, Mahathi Kandimalla, I-Min A Chen, Nikos C Kyrpides, and T B K Reddy. Genomes OnLine Database (GOLD) v.8: overview and updates. *Nucleic Acids Research*, 49(D1):D723–D733, 11 2020.
- [100] Jun Wang, Lei Kong, Ge Gao, and Jingchu Luo. A brief introduction to web-based genome browsers. *Briefings in Bioinformatics*, 14(2):131–143, 2013.
- [101] P. A. Fujita, B. Rhead, A. S. Zweig, A. S. Hinrichs, D. Karolchik, M. S. Cline, M. Goldman, G. P. Barber, H. Clawson, A. Coelho, M. Diekhans, T. R. Dreszer, B. M. Giardine, R. A. Harte, J. Hillman-Jackson, F. Hsu, V. Kirkup, R. M. Kuhn, K. Learned, C. H. Li, L. R. Meyer, A. Pohl, B. J. Raney, K. R. Rosenbloom, K. E. Smith, D. Haussler, and W. J. Kent. The UCSC Genome Browser database: update 2011. *Nucleic Acids Res*, 39(Database issue):D876–882, Jan 2011.
- [102] J. Navarro Gonzalez, A. S. Zweig, M. L. Speir, D. Schmelter, K. R. Rosenbloom, B. J. Raney, C. C. Powell, L. R. Nassar, N. D. Maulding, C. M. Lee, B. T. Lee, A. S. Hinrichs, A. C. Fyfe, J. D. Fernandes, M. Diekhans, H. Clawson, J. Casper, A. Benet-Pagès, G. P. Barber, D. Haussler, R. M. Kuhn, M. Haeussler, and W. J. Kent. The UCSC Genome Browser database: 2021 update. *Nucleic Acids Res*, 49(D1):D1046–D1057, 01 2021.

- [103] W James Kent, Charles W Sugnet, Terrence S Furey, Krishna M Roskin, Tom H Pringle, Alan M Zahler, and David Haussler. The human genome browser at ucsc. *Genome research*, 12(6):996–1006, 2002.
- [104] J. T. Robinson, H. Thorvaldsdóttir, W. Winckler, M. Guttman, E. S. Lander, G. Getz, and J. P. Mesirov. Integrative genomics viewer. *Nat Biotechnol*, 29(1):24–26, Jan 2011.
- [105] James T. Robinson, Helga Thorvaldsdóttir, Aaron M. Wenger, Ahmet Zehir, and Jill P. Mesirov. Variant Review with the Integrative Genomics Viewer. *Cancer Research*, 77(21):e31–e34, 10 2017.
- [106] James T. Robinson, Helga Thorvaldsdóttir, Douglass Turner, and Jill P. Mesirov. igv.js: an embeddable javascript implementation of the integrative genomics viewer (igv). *bioRxiv*, 2020.
- [107] Thomas E Creighton. Protein folding. *Biochemical journal*, 270(1):1, 1990.
- [108] K. A. Dill, S. B. Ozkan, M. S. Shell, and T. R. Weikl. The protein folding problem. *Annu Rev Biophys*, 37:289–316, 2008.
- [109] Márcio Dorn, Mariel Barbachan e Silva, Luciana S. Buriol, and Luis C. Lamb. Three-dimensional protein structure prediction: Methods and computational strategies. *Computational Biology and Chemistry*, 53:251–276, 2014.
- [110] K. Illergård, D. H. Ardell, and A. Elofsson. Structure is three to ten times more conserved than sequence—a study of structural response in protein cores. *Proteins*, 77(3):499–508, Nov 2009.
- [111] Deepmind. <https://www.deepmind.com/>. Accessed: 2022-08-07.
- [112] Alphabet. <https://abc.xyz/>. Accessed: 2022-08-07.
- [113] Mohammed AlQuraishi. AlphaFold at CASP13. *Bioinformatics*, 35(22):4862–4865, 05 2019.
- [114] Zongyang Du, Hong Su, Wenkai Wang, Lisha Ye, Hong Wei, Zhenling Peng, Ivan Anishchenko, David Baker, and Jianyi Yang. The trrosetta server for fast and accurate protein structure prediction. *Nature Protocols*, 16(12):5634–5651, Dec 2021.

- [115] Joana Pereira, Adam J. Simpkin, Marcus D. Hartmann, Daniel J. Rigden, Ronan M. Keegan, and Andrei N. Lupas. High-accuracy protein structure prediction in casp14. *Proteins: Structure, Function, and Bioinformatics*, 89(12):1687–1699, 2021.
- [116] The Galaxy Community. The Galaxy platform for accessible, reproducible and collaborative biomedical analyses: 2022 update. *Nucleic Acids Research*, 50(W1):W345–W351, 04 2022.
- [117] D. Blankenberg, N. Coraor, G. Von Kuster, J. Taylor, and A. Nekrutenko. Integrating diverse databases into an unified analysis framework: a Galaxy approach. *Database (Oxford)*, 2011:bar011, 2011.
- [118] A. Nekrutenko, D. Baker, N. Coraor, B. Chapman, E. Afgan, and J. Taylor. Galaxy CloudMan: delivering cloud compute clusters. *BMC Bioinformatics*, 11 Suppl 12:S4, Dec 2010.
- [119] M. C. Schatz. The missing graphical user interface for genomics. *Genome Biol*, 11(8):128, 2010.
- [120] A. Ronacher and open source community. Flask, 2010. Available at <https://flask.palletsprojects.com/en/2.1.x/>.
- [121] Mark Raasveldt and Hannes Mühleisen. Duckdb: An embeddable analytical database. In *Proceedings of the 2019 International Conference on Management of Data, SIGMOD '19*, page 1981–1984, New York, NY, USA, 2019. Association for Computing Machinery.
- [122] Richard D Hipp. SQLite, 2020. Available at <https://www.sqlite.org>.
- [123] Timo Kersten, Viktor Leis, Alfons Kemper, Thomas Neumann, Andrew Pavlo, and Peter Boncz. Everything you always wanted to know about compiled and vectorized queries but were afraid to ask. *Proc. VLDB Endow.*, 11(13):2209–2222, sep 2018.
- [124] The pandas development team. pandas-dev/pandas: Pandas, February 2020. Available at <https://doi.org/10.5281/zenodo.3509134>.
- [125] Dougherty J. Schutz S., Casbon J., 2012. Available at <https://github.com/dridk/PyVCF3>.
- [126] H. Li, B. Handsaker, A. Wysoker, T. Fennell, J. Ruan, N. Homer, G. Marth, G. Abecasis, and R. Durbin. The Sequence Alignment/Map format and SAMtools. *Bioinformatics*, 25(16):2078–2079, Aug 2009.

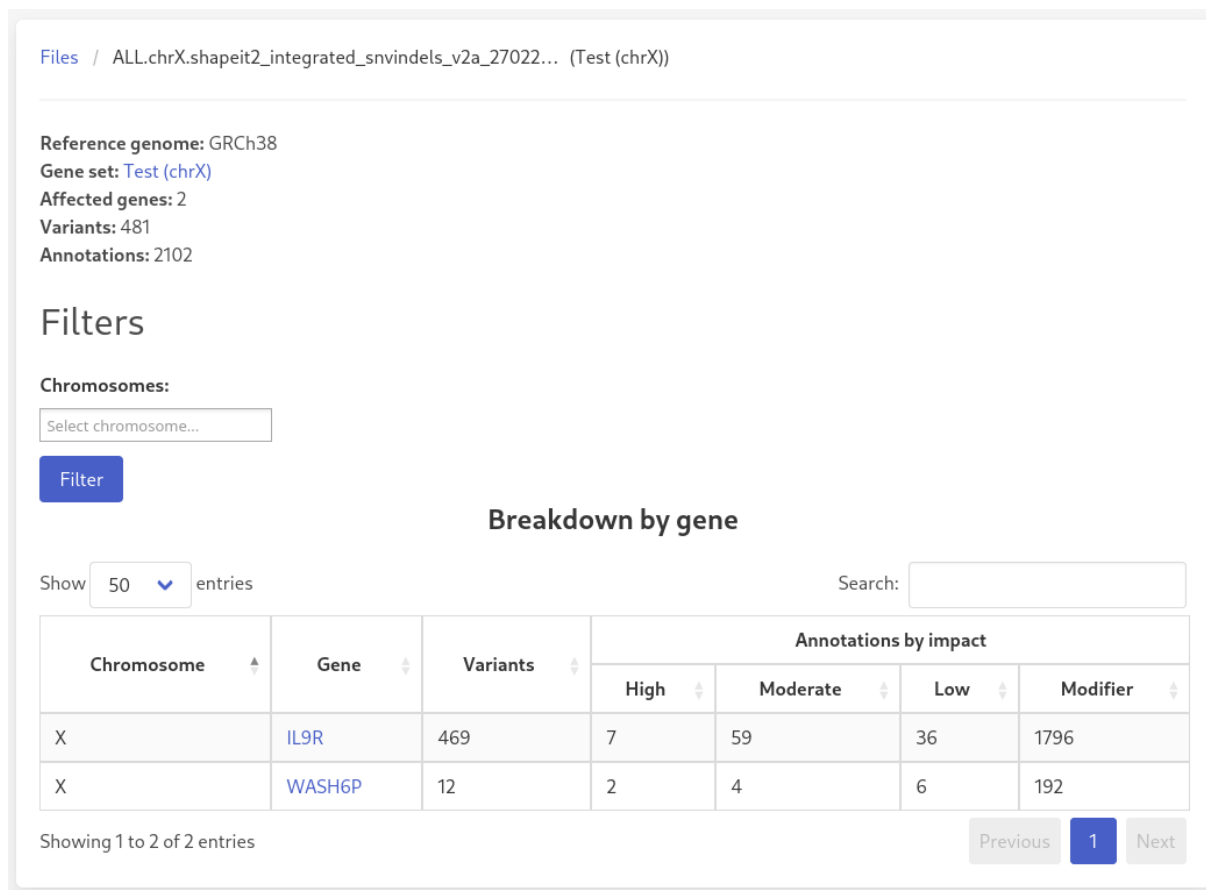
- [127] Marshall J. Heger A. and the open source community, 2009. Available at <https://github.com/pysam-developers/pysam>.
- [128] Johan T. den Dunnen, Raymond Dalglish, Donna R. Maglott, Reece K. Hart, Marc S. Greenblatt, Jean McGowan-Jordan, Anne-Francoise Roux, Timothy Smith, Stylianos E. Antonarakis, and Peter E.M. Taschner. Hgvs recommendations for the description of sequence variants: 2016 update. *Human Mutation*, 37(6):564–569, 2016.
- [129] M. Wang, K. M. Callenberg, R. Dalglish, A. Fedtsov, N. K. Fox, P. J. Freeman, K. B. Jacobs, P. Kaleta, A. J. McMurphy, A. Prlić, V. Rajaraman, and R. K. Hart. hgvs: A Python package for manipulating sequence variants using HGVS nomenclature: 2018 Update. *Hum Mutat*, 39(12):1803–1813, 12 2018.
- [130] Sue Povey, Ruth Lovering, Elspeth Bruford, Mathew Wright, Michael Lush, and Hester Wain. The hugo gene nomenclature committee (hgnc). *Human genetics*, 109(6):678–680, 2001.
- [131] A. D. Yates, P. Achuthan, W. Akanni, J. Allen, and et al. Ensembl 2020. *Nucleic Acids Res*, 48(D1):D682–D688, 01 2020.
- [132] Lydie Lane, Ghislaine Argoud-Puy, Aurore Britan, Isabelle Cusin, Paula D. Duek, Olivier Evalet, Alain Gateau, Pascale Gaudet, Anne Gleizes, Alexandre Masselot, Catherine Zwahlen, and Amos Bairoch. neXtProt: a knowledge platform for human proteins. *Nucleic Acids Research*, 40(D1):D76–D83, 12 2011.
- [133] Jan Vijg. Snp’ing for longevity. *Aging*, 1(5):442, 2009.
- [134] Wei-Guang Zhang, Xiao-Juan Bai, and Xiang-Mei Chen. Sirt1 variants are associated with aging in a healthy han chinese population. *Clinica Chimica Acta*, 411(21-22):1679–1683, 2010.
- [135] Lutz Hamann, Juan S Ruiz-Moreno, Malgorzata Szwed, Malgorzata Mossakowska, Linn Lundvall, Ralf R Schumann, Bastian Opitz, and Monika Puzianowska-Kuznicka. Sting snp r293q is associated with a decreased risk of aging-related diseases. *Gerontology*, 65(2):145–154, 2019.
- [136] Petr Danecek, Adam Auton, Goncalo Abecasis, Cornelis A Albers, Eric Banks, Mark A DePristo, Robert E Handsaker, Gerton Lunter, Gabor T Marth, Stephen T Sherry, et al. The variant call format and vcftools. *Bioinformatics*, 27(15):2156–2158, 2011.

- [137] Pablo Cingolani, Fiona Cunningham, Will McLaren, and Kai Wang. Variant annotations in vcf format. *January (January)*, 2018.
- [138] Artem Chebotko, Andrey Kashlev, and Shiyong Lu. A big data modeling methodology for apache cassandra. pages 238–245, 06 2015.
- [139] Ewa M Michalak, Marian L Burr, Andrew J Bannister, and Mark A Dawson. The roles of dna, rna and histone methylation in ageing and cancer. *Nature reviews Molecular cell biology*, 20(10):573–589, 2019.
- [140] G. Barturen, A. Rueda, J. L. Oliver, and M. Hackenberg. MethylExtract: High-Quality methylation maps and SNV calling from whole genome bisulfite sequencing data. *F1000Res*, 2:217, 2013.
- [141] Angelika Merkel, Marcos Fernández-Callejo, Eloi Casals, Santiago Marco-Sola, Ronald Schuyler, Ivo G Gut, and Simon C Heath. gemBS: high throughput processing for DNA methylation data from bisulfite sequencing. *Bioinformatics*, 35(5):737–742, 08 2018.
- [142] Laura Clarke, Xiangqun Zheng-Bradley, Richard Smith, Eugene Kulesha, Chunlin Xiao, Iliana Toneva, Brendan Vaughan, Don Preuss, Rasko Leinonen, Martin Shumway, et al. The 1000 genomes project: data management and community access. *Nature methods*, 9(5):459–462, 2012.
- [143] Steven A Rosenberg. Finding suitable targets is the major obstacle to cancer gene therapy. *Cancer gene therapy*, 21(2):45–47, 2014.
- [144] Snpeff and snpsift. <https://pcingola.github.io/SnpEff/>. Accessed: 2022-08-03.

Приложение

Files				
<div>Add a file</div>				
Show 50 entries		Search: <input type="text"/>		
Name	Gene set	Created at	Status	Actions
ALL.chr14.shapeit2_integrated_snvindels_v2a_27022019.GRCh38.phased.vcf.gz	HAGR genes	18:03 07.08.2022	processed	Delete
ALL.chrX.shapeit2_integrated_snvindels_v2a_27022019.GRCh38.phased.vcf.gz	Test (chrX)	12:32 30.07.2022	processed	Delete
Showing 1 to 2 of 2 entries			<div>Previous1Next</div>	

Фигура 13: Списък от файлове.



Фигура 14: Обзор на файл.

WASP family homolog 6, pseudogene (WASH6P)

ALL.chrX.shapeit2_integrated_snvindels_v2a_27022019.GRCh38.phased.vcf.gz

Files / ALL.chrX.shapeit2_integrated_snvindels_v2a_27022... (Test (chrX)) / WASH6P

Chromosome: X
Ensembl: ENSG00000182484
Entrez: 653440
HGNC: HGNC:31685
HAGR: WASH6P
UniProt: Q9NQA3

List variants

Protein annotation (Q9NQA3)

FUNCTION INFO

May act as a nucleation-promoting factor at the surface of endosomes, where it recruits and activates the Arp2/3 complex to induce actin polymerization, playing a key role in the fission of tubules that serve as transport intermediates during endosome sorting.

GOLD

GO BIOLOGICAL PROCESS

Involved in endosomal transport

GO:0016197

GOLD

Involved in Arp2/3 complex-mediated actin nucleation

GO:0034314

GOLD

Involved in retrograde transport, endosome to Golgi

GO:0042147

GOLD

Involved in exocytosis

GO:0006887

SILVER

Involved in endocytic recycling

GO:0032456

SILVER

GO MOLECULAR FUNCTION

Enables actin binding

GO:0003779

GOLD

Enables alpha-tubulin binding

GO:0043014

GOLD

Enables gamma-tubulin binding

GO:0043015

SILVER

Фигура 15: Обща информация за гена.

Filters

Transcript biotypes:

Select transcript biotypes...

Filter

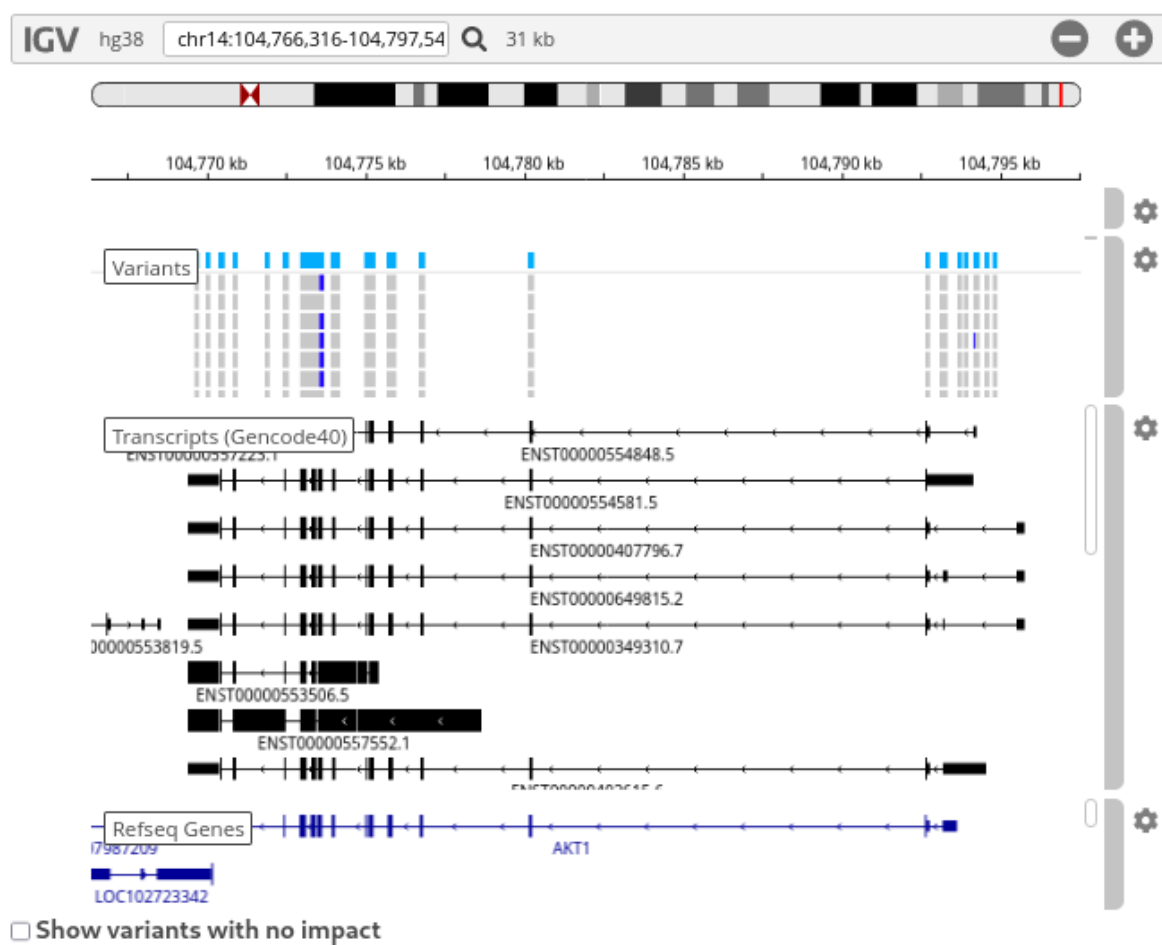
Effects by impact

Search:

Impact	Effect	Count
HIGH	stop_gained	1
HIGH	frameshift_variant	1
MODERATE	missense_variant	4
LOW	synonymous_variant	6
MODIFIER	downstream_gene_variant	96
MODIFIER	non_coding_transcript_exon_variant	96

Showing 1 to 6 of 6 entries

Фигура 16: Разбивка на аотираните варианти и техните предсказани ефекти.



Фигура 17: Геномен браузър за изследване на генетичните варианти.

Variants

Filters

Transcript biotypes:

protein_coding ✕

Impacts:

MODERATE ✕

HIGH ✕

Effects:

stop_gained ✕

frameshift_variant ✕

Feature types:

Select feature types...

Filter

Show 100 ▾ entries

Search:

Start	End	Reference	Alternative	Type	Subtype	Actions
156025260	156025261	TG	T	indel	del	Focus in browser Details
156025330	156025330	C	T	snp	ts	Focus in browser Details

Showing 1 to 2 of 2 entries

Previous

1

Next

Фигура 18: Таблица с геномни варианти и филтри.



Фигура 19: Сравнение на референтен и алтернативен протеин. Мястото на полиморфизма е оцветено в червено. В този пример аминокиселината треонин на позиция 78 е заменена с изолевцин.