

Základní bioinformatické pojmy a postupy využívané pro analýzu DNA pomocí sekvenování nové generace

Tom N.^{1,2}, Pardy F.³, Kotašková J.¹, Plevová K.^{1,2}, Pospíšilová Š.^{1,2}

¹Centrum molekulární medicíny, CEITEC (Central European Institute of Technology), Masarykova univerzita, Brno

²Centrum molekulární biologie a genové terapie, Interní hematologická a onkologická klinika, Fakultní nemocnice Brno a Lékařská fakulta Masarykovy univerzity, Brno

³Centrální laboratoř Genomika, CEITEC (Central European Institute of Technology), Masarykova univerzita, Brno

Transfuzní Hematol. dnes, 24, 2018, No. 3, p. 174-180

SOUHRN

Metoda sekvenování nové generace (NGS) se stala velmi populární v biomedicíně výzkumu i v klinické praxi zejména proto, že umožňuje rychlý a detailní vhled do genomu pacienta. V kontextu nádorových onemocnění umožňují metody NGS přesnou detekci jak zárodečných změn, tak zejména somatických mutací, které mohou pomoci rychle a precizně stanovit diagnózu a přizpůsobit léčbu podle individuálních potřeb pacienta. Vývojem nových výpočetních metod a jejich aplikací za účelem precizního zpracování NGS dat se zabývá vědní obor bioinformatika. Bioinformatická analýza je komplexní proces, jehož správné nastavení je klíčové pro získání relevantních výsledků. Je proto nutné, aby bioinformatik detailně porozuměl biologické podstatě sledovaného jevu, jako je například vznik genových mutací v průběhu onemocnění. Z hlediska bioanalytika i lékaře je naopak užitečné znát jak možnosti a limity NGS technologie, tak i základní bioinformatickou terminologii, na základě které jsou pak schopni s bioinformatikou efektivně komunikovat. V této souhrnné práci se proto autoři snaží obecně popsat bioinformatickou analýzu sekvenovaných dat s důrazem na vysvětlení základních pojmů používaných v oblasti analýzy NGS dat.

KLÍČOVÁ SLOVA

sekvenování nové generace – bioinformatika – pipeline

SUMMARY

Tom N., Pardy F., Kotašková J., Plevová K., Pospíšilová Š.

Next generation sequencing: basic bioinformatic terms and analytic protocols for DNA analysis

Next generation sequencing (NGS) has become very popular both in research and clinical practice, in particular because it allows detailed and rapid insight into the patient's genome. Within the context of cancer research, NGS methods allow precise detection of germline and especially somatic mutations, which can help to diagnose a disease quickly and precisely and thus enable treatment administration based on individual patient needs. The development of novel computing methods and their application for accurate processing of NGS data is the objective of the scientific field of bioinformatics. Bioinformatic analysis is a complex process and its precise set-up is absolutely crucial for obtaining relevant results. Thus, it is necessary for bioinformaticians to understand the biological principles of the given analysis, such as the development of somatic mutations during disease course. From the perspective of a bio-analyst or physician, it is essential to understand the challenges and limits of NGS technology; basic knowledge of bioinformatics and its terminology allows for effective communication with bioinformaticians. In this review, the authors attempt to describe bioinformatic analysis with emphasis on explaining the basic concepts used in the NGS data analysis.

KEY WORDS

next generation sequencing – bioinformatics – pipeline

SEKVENOVÁNÍ NOVÉ GENERACE - PRINCIP A VYUŽITÍ

Sekvenování DNA je proces určování pořadí nukleotidů v molekule nukleové kyseliny. První pokusy přečíst pořadí nukleotidů spadají do 70. let minulého století [1]. Sekvenování nové generace (NGS) je moderní způsob sekvenování, označovaný také jako “masivně paralelní sekvenování”, který umožňuje souběžné čtení milionů až miliard sekvenovaných úseků o délce desítek až tisíců nukleotidů. NGS se objevilo začátkem 21. století a v posledních letech se začalo využívat v mnoha oblastech biologie a medicíny. Svou popularitu získalo zejména díky své vysoké kapacitě, rychlosti zpracování a citlivosti analýzy. V těchto ohledech NGS zdaleka převyšuje klasickou metodu Sangerova sekvenování. Zatímco Sangerovým sekvenováním můžeme sekvenovat v jednom experimentu desítky až stovky sekvencí o délce maximálně 1 kb s citlivostí detekce alelické varianty okolo 15 % [2], pomocí technologie NGS lze analyzovat desítky milionů až miliardy sekvencí v délce až 600 bází, přičemž limit detekce lze při správném provedení snížit pod 1 % [3-5]. V důsledku značného rozšíření NGS došlo postupně i k výraznému snížení nákladů na sekvenování, které byly v počátku zavedení metody extrémně vysoké.

Na poli NGS se postupně vystřídal několik technologických platform, např. pyrosekvenování (Roche, 454), sekvenování pomocí ligace – SOLiD (Thermo Fisher Scientific, Inc.) nebo sekvenování založené na změně elektrického potenciálu – *Ion semiconductor sequencing* (Thermo Fisher Scientific, Inc.). Dnes je dominující technologií tzv. sekvenování syntézou (*sequencing by synthesis* – SBS) firmy Illumina. V současné době se v laboratořích setkáváme nejčastěji se sekvenátory MiSeq, NextSeq či HiSeq, které se liší svou kapacitou. Poptávka po technologiích, které mohou pracovat ještě rychleji a produkovat delší čtení, vyústila v rozvoj sekvenování tzv. “třetí” generace, které je schopno analyzovat velmi dlouhé fragmenty DNA (desítky až stovky kilobází) v reálném čase bez potřeby PCR. Ke třetí generaci patří přístroje PacBio RSII a Sequel (Pacific Biosciences) či přenosný sekvenátor minION (Oxford Nanopore Technologies). Jejich využití v klinické praxi je však zatím omezené, zejména kvůli náročnosti na přípravu vzorku a nižší kvalitě výstupních dat.

NGS technologie přináší celou řadu možností využití. Mohou například sloužit k identifikaci zárodečných variant ve velkém počtu genů současně. Oproti klasickým metodám sekvenování, které sloužily k detekování jednonukleotidových záměn nebo krátkých inzercí a delecí, umožňují NGS technologie navíc určit také změny v počtu kopií celých genomových oblastí nebo identifikovat strukturní varianty, čímž může do

jisté míry konkurovat cytogenetickým vyšetřením. Trendem poslední doby jsou tzv. genové panely. Jedná se o soubory desítek až stovek vyšetřovaných genů, jejichž výběr je definován cílem vyšetření. Tyto panely jsou vhodné pro diferenciální diagnostiku konkrétní skupiny onemocnění nebo lze využít obecnější panely např. pro analýzu genů spojených s hereditárními onemocněními. Existují i sady umožňující testování celého exomu, tzn. všech přepisovaných genů. Nejpokročilejší metodou z hlediska rozsahu sekvenovaných oblastí je potom sekvenování celých genomů, které je ale zatím v klinické praxi využíváno pouze okrajově.

Významnou oblastí využití NGS je nádorová genetik. I zde se uplatňují různé varianty genových panelů navržených pro konkrétní onemocnění (např. ClearSeq *AML panel*) nebo panely zahrnující stovky genů asociovaných s různými typy nádorů (např. Truseq *Pan cancer panel*). Vysoká citlivost, kterou NGS umožňuje, je s výhodou využívána kromě detekce zárodečných variant také k detekci somatických klonálních mutací nebo dokonce ke sledování zbytkové choroby u hematologických malignit. Tato vysoká citlivost detekce umožňuje zachytit DNA s nízkým zastoupením ve vzorku – toho se využívá u metod sledujících tzv. cirkulující DNA z rozpadajících se nádorových buněk (*circulating tumor DNA*; ctDNA), která je izolována z krevní plazmy; tento způsob vyšetření nádoru se označuje jako “*liquid biopsy*”. Mimo onkologii lze podobný postup uplatnit pro stanovení genetických aberací plodu z fetální frakce v krvi matky (*cffDNA* – *cell free fetal DNA*).

NGS analýzy produkují obrovské množství primárních dat, které je nutné vhodně upravit a správně vyhodnotit, což přispělo k dynamickému rozvoji nového vědního oboru – bioinformatiky, která se zabývá analýzou biologických dat pomocí výpočetních metod. Volba způsobu bioinformatického zpracování je kritickým krokem NGS každé analýzy. Jeho správné nastavení a provedení vyžaduje jak porozumění biologické podstatě experimentu, tak znalost relevantních softwarových nástrojů a analytických postupů.

Běžnou součástí komunikace, která se týká NGS experimentů a zpracování dat, jsou anglické pojmy označující jednotlivé kroky nebo součásti analýzy. České ekvivalenty se zatím příliš nevězily. V textu jsme se proto vyvarovali násilných překladů a dali jsme přednost původním anglickým výrazům.

NÁVRH A PŘÍPRAVA SEKVENAČNÍHO EXPERIMENTU

Považujeme za nutné pro úplnost zmínit laboratorní část NGS procesu, která je pro zpracování dat do značné míry určující. Možnosti přípravy vzorku pro NGS expe-

riment jsou vzhledem k prudkému rozvoji této oblasti velmi široké. V první řadě je potřeba stanovit si oblasti zájmu, tzv. ROI (*regions of interest*), které chceme pomocí NGS analyzovat, a shromáždit příslušnou informaci o těchto oblastech do přehledného souboru (např. bed). Pokud se jedná o jednotlivé geny, popř. několik málo genů, volíme většinou přípravu vzorku založenou na PCR amplifikaci. U většího souboru genů jsou metodou volby jak PCR přístupy, tak postupy využívající tzv. *enrichment probes* [6], tedy hybridizační sondy, kterými je možné obohatit sekvenační knihovnu o oblasti zájmu a zároveň minimalizovat nežádoucí sekvenční knihovna. Jedná se o směs náhodných fragmentů DNA o předem stanovené délce, jenž jsou ohraničeny známými, synteticky připravenými sekvencemi, označovanými jako tzv. **adaptéry**. Tyto adaptéry obsahují sekvenční knihovny, které umožňují:

- a) amplifikaci knihovny pomocí PCR;
- b) identifikaci vzorků, a tedy jejich míchání do jedné sekvenační reakce, tzv. *multiplexing*;
- c) hybridizaci fragmentů v sekvenačním čipu.

Modifikací, která zvyšuje detekční limit pro záchyt varianty, je přidání tzv. unikátních molekulárních identifikátorů (UMI) do sekvenční adaptéry. Jedná se o sekvenci 8-10 náhodných nukleotidů, která je unikátní pro každý vstupní fragment DNA [7]. Výběr vlastní sekvenační platformy závisí na typu experimentu, velikosti analyzovaného genomu, požadované hloubce pokrytí, přesnosti a ceně.

Bioinformatická analýza NGS dat

Bioinformatická analýza by měla být přizpůsobena na míru použité sekvenační technologii, sekvenačnímu kitu, experimentálnímu designu a v neposlední řadě biologické hypotéze či diagnostickým potřebám. Každé vyhodnocení NGS dat zahrnuje sekvenci kroků, výpočetní postup, který se označuje jako tzv. **pipeline**. Jako modelová je zde popsána *pipeline* sloužící k identifikaci variant na úrovni DNA (obr. 1). Běžně používané nástroje pro jednotlivé kroky jsou popsány v tabulce 1.

Obecná *pipeline* pro účely detekce mutací v DNA zahrnuje tyto základní kroky:

1. Kontrola kvality vstupních dat
2. Úpravy dat před mapováním
3. Mapování individuálně čtených sekvencí (tzv. *reads*; dále sekvenační čtení) na referenční genom
4. Úpravy dat po mapování
5. Detekce variant
6. Anotace detekovaných variant
7. Vizualizace

V průběhu analýzy je využíváno několik různých datových formátů, jejichž základní přehled je uveden v tabulce 2.

Kontrola kvality (QC) vstupních dat

Po dokončení sekvenační reakce musí být zkontrolován její správný průběh a zhodnocena kvalita generovaných dat. Data jsou získána nejčastěji v podobě souborů formátu *.fastq*, který obsahuje sekvenční analýzy fragmentů a informaci o jejich kvalitě [8].

Úprava dat před mapováním

Pro zvýšení kvality sekvenačních čtení se využívají některé analytické postupy [9]:

- spojování překrývajících se konců párových sekvenačních čtení tzv. **merging**
- párová sekvenační čtení představují fragment DNA čtený z obou jeho konců. V oblasti překryvu je tak infor-

Tab. 1. Seznam běžně používaných nástrojů pro jednotlivé kroky analytické *pipeline*

Analytický krok	Používaný nástroj
Kontrola kvality vstupních dat	FastQC [23] AfterQC [24]
Úprava dat před mapováním	AdapterRemoval [25] Cutadapt [26] Trimmomatic [27]
Mapování sekvenačního čtení na referenční genom	BWA [28] Bowtie2 [29]
Analýza pokrytí	BEDtools [30] Picard [31] featureCounts [32]
Odstranění duplikátů	Picard [31] fgbio [33]
Detekce variant (<i>variant calling</i>)	
• zárodečné SNV a krátké InDels	Freebayes [34] HaplotypeCaller [35]
• somatické SNV a krátké InDels	Mutect2 [35] VarDict [36] Varscan2 [37]
• SNV a krátké InDels s využitím UMI	smCounter2 [3] DeepSNVMiner [38]
• CNV	CNVnator [39] CNVer [40]
• SV	BreakDancer [41] DELLY [42]
Anotace	ANNOVAR [43] SnpEff [44]
Vizualizace	Integrative Genomics Viewer [43]

Tab. 2. Seznam nejčastěji používaných formátů souborů

Přípona	Celý název (anglicky)	Informační obsah
.bam	Binary Alignment Map	mapované sekvence (komprimované)
.bed	Browser Extensible Data	genomické intervaly
.fasta		nenamapované sekvence (referenční genom)
.fastq		nenamapované sekvence (surová sekvenační data)
.gff	General Feature Format	anotace
.gtf	General Transfer Format	anotace
.maf	Mutation Annotation Format	seznam variant
.sam	Sequence Alignment Map	mapované sekvence
.vcf	Variant Call Format	seznam variant

mace o sekvenci získána ze dvou sekvenačních čtení, a proto je spolehlivější;

- odstranění nekvalitních konců sekvenačního čtení tzv. **trimming**

– přesnost sekvenační reakce se v jejím průběhu snižuje, a tak se snižuje i kvalita bází s rostoucí délkou sekvenačních čtení. Z tohoto důvodu je v určitých případech vhodné odstranit nekvalitní konce, které mohou být zdrojem nepřesných výsledků;

- filtrování na požadovanou délku sekvenačního čtení, tzv. **length filtering**

– používá se zejména pro odstranění kontaminace jak adaptérovými, tak biologickými sekvencemi.

Mapování sekvenačních čtení na referenční genom

V dalším kroku jsou jednotlivá sekvenační čtení zarovnána k referenčnímu genomu. Tento krok je označován jako tzv. **read alignment/read mapping** [10]. Referenční genom představuje jednovláknovou konsenzuální sekvenci určitého organismu. V případě člověka obsahuje referenční genom 3 miliardy bází. Tato část bioinformatické analýzy je stěžejní a její přesnost významně ovlivňuje celkovou kvalitu výsledků.

Účelem mapování sekvenačních čtení na referenční genom je:

- identifikovat, jakou část genomu sekvenační čtení představují;
- zjistit rozdíly mezi referenční sekvencí a sekvencí sekvenačních čtení;
- stanovit statistiku pokrytí a podíl sekvencí mimo ROI.

Výsledky mapování jsou typicky uloženy do souboru formátu .sam nebo .bam. Po mapování se často provádí další kontrola kvality, která je zaměřena na analýzu pokrytí, tzv. **coverage**. Cílem je ověřit, zda byly regiony zájmu (obvykle definované v souboru formátu .bed, .gff

nebo .gtf) osekvenovány. Od hloubky pokrytí, tzn. počtu překrývajících se sekvenačních čtení na určité pozici, tzv. **coverage depth**, je odvozena citlivost detekce. Obecně platí, že čím větší hloubka pokrytí, tím větší citlivost [11]. Vysoká citlivost NGS je využívána zejména u experimentů analyzujících subklonální somatické mutace u nádorových onemocnění, případně při sledování zbytkové choroby u léčených hematologických pacientů.

Úpravy po mapování sekvenačních čtení

Kvalita mapování může být vylepšena několika analytickými kroky zahrnujícími např. odstranění PCR duplikátů, které vznikají jako artefakt při amplifikaci [12]. Jejich přítomnost může zkreslit informaci o frekvenci variantních alel (**VAF** – „variant allele frequency“). Odstranění PCR duplikátů není vhodné provádět v případě knihoven založených na obohacení regionů zájmu pomocí PCR, jejich produkty mohou být s PCR duplikáty zaměněny. Výjimkou jsou knihovny využívající technologii UMI, která slouží právě pro odstranění PCR duplikátů a korekci sekvenačních chyb [13].

Detekce variant

Detekce variant se označuje jako tzv. **variant calling**. Principem tohoto procesu je identifikace pozic, kde se nukleotidy v sekvenačních čtení liší od referenčního genomu a zejména pak ověření, zda není konkrétní nalezená nukleotidová záměna jen sekvenační či analytický artefakt, a zda se skutečně jedná o variantu v testované DNA.

Softwarový nástroj pro tyto účely se označuje jako, tzv. **variant caller**. Tyto programy jsou vyvíjeny specificky pro detekci konkrétních typů záměn, ať somatických, nebo zárodečných [14, 15]:

- jednonukleotidových záměn (SNV) a krátkých inzercí a delecí (InDels)

užívá pro kontrolu detekce inzercí a delecí, a zobrazení variant v kombinaci s anotacemi z různých veřejných databází. Jako příklad jsou na obrázku 1 uvedeny sekvenční čtení namapované na referenční genom se zvýrazněnými záměnami, které mohou představovat jak reálné varianty, tak chyby vzniklé při laboratorním zpracování nebo bioinformatické analýze.

ZÁVĚR

I přes skutečnost, že je dnes sekvenování nové generace dobře zavedenou metodou ve výzkumu, pro klinickou aplikaci nejsou stále dostatečně definovány standardy, jak na úrovni laboratorního zpracování a přípravy vzorků, tak následné bioinformatické analýzy. Pro správnou interpretaci výsledků NGS analýzy je velmi důležité, aby lékař rozuměl možnostem a limitům NGS technologie včetně základů analýzy dat. V textu jsme si kladli za cíl shrnout a objasnit nejdůležitější pojmy a kroky bioinformatické analýzy určené k detekci variant v DNA.

Seznam zkratk

AML	– Acute myeloid leukemia
cffDNA	– cell-free fetal DNA
CNV	– Copy number variation
ctDNA	– Circulating tumor DNA
DNA	– deoxyribonukleová kyselina
InDels	– inzerce delece
NGS	– Next-generation sequencing
PCR	– Polymerase chain reaction
QC	– Quality control
ROI	– Region of interest
SNV	– Single Nucleotide Variant
SV	– Structural variation
UMI	– Unique molecular identifier
VAF	– Variant allele frequency

LITERATURA

- Heather JM, Chain B. The sequence of sequencers: The history of sequencing DNA. *Genomics* 2016;107:1–8.
- Tsiatis AC, Norris-Kirby A, Rich RG, et al. Comparison of Sanger sequencing, pyrosequencing, and melting curve analysis for the detection of KRAS mutations. *J Mol Diagn* 2010;12:425–432.
- Malcikova J, Stano-Kozubik K, Tichy B, et al. Detailed analysis of the therapy-driven clonal evolution of TP53 mutations in chronic lymphocytic leukemia. *Leukemia* 2015;29:877–885.
- Xu C, Gu X, Padmanabhan R, et al. smCounter2: an accurate low-frequency variant caller for targeted sequencing data with unique molecular identifiers. *bioRxiv* 2018;281659; DOI: <https://doi.org/10.1101/281659>.
- Newman AM, Lovejoy AF, Klass DM, et al. Integrated digital error suppression for improved detection of circulating tumor DNA. *Nat Biotechnol* 2016;34:547–555.
- Gnirke A, Melnikov A, Maguire J, et al. Solution hybrid selection with ultra-long oligonucleotides for massively parallel targeted sequencing. *Nat Biotechnol* 2009;27:182–189.
- Kivioja T, Vähärautio A, Karlsson K, et al. Counting absolute numbers of molecules using unique molecular identifiers. *Nat Methods* 2011;9:72–74.
- Cock PJA, Fields CJ, Goto N, Heuer ML, Rice PM. The Sanger FASTQ file format for sequences with quality scores, and the Solexa/Illumina FASTQ variants. *Nucleic Acids Res* 2010;38:1767–1771.
- Fabbro CD, Scalabrin S, Morgante M, Giorgi FM. An extensive evaluation of read trimming effects on Illumina NGS data analysis. *PLoS One* 2013; publ. elektronicky 23. 12. 2013. DOI:10.1371/journal.pone.0085024.
- Fonseca NA, Rung J, Brazma A, Marioni JC. Tools for mapping high-throughput sequencing data. *Bioinformatics* 2012;28:3169–3177.
- Sims D, Sudbery I, Illott NE, Heger A, Ponting CP. Sequencing depth and coverage: key considerations in genomic analyses. *Nat Rev Genet* 2014;15:121–132.
- Ebbert MTW, Wadsworth ME, Staley LA, et al. Evaluating the necessity of PCR duplicate removal from next-generation sequencing data and a comparison of approaches. *BMC Bioinformatics* 2016; publ. el. 25. 6. 2016. DOI:10.1186/s12859-016-1097-3.
- Kou R, Lam H, Duan H, et al. Benefits and challenges with applying unique molecular identifiers in next generation sequencing to detect low frequency mutations. *PLoS One* 2016; publ. el. 11. 1. 2016. DOI:10.1371/journal.pone.0146638.
- Xu C. A review of somatic single nucleotide variant calling algorithms for next-generation sequencing data. *Comp Struct Biotechnol J* 2018;16:15–24.
- Zhao M, Wang Q, Wang Q, Jia P, Zhao Z. Computational tools for copy number variation (CNV) detection using next-generation sequencing data: features and perspectives. *BMC Bioinformatics* 2013;14:S1. publ. el. 13. 9. 2013. DOI:10.1186/1471-2105-14-S11-S1.
- Smigielski EM, Sirotkin K, Ward M, Sherry ST. dbSNP: a database of single nucleotide polymorphisms. *Nucleic Acids Res* 2000;28:352–355.
- International HapMap Consortium. The International HapMap Project. *Nature* 2003;426:789–796.
- Forbes SA, Bhamra G, Bamford S, et al. The catalogue of somatic mutations in cancer (COSMIC). *Curr Protoc Hum Genet* 2008; publ. el. 6. 7. 2008. DOI: 10.1002/0471142905.hg1011s57.
- Stenson PD, Mort M, Ball EV, Shaw K, Phillips AD, Cooper DN. The Human Gene Mutation Database: building a comprehensive mutation repository for clinical and molecular genetics, diagnostic testing and personalized genomic medicine. *Hum Genet* 2014;133:1–9.
- Landrum MJ, Lee JM, Riley GR, et al. ClinVar: public archive of relationships among sequence variation and human phenotype. *Nucleic Acids Res* 2014; publ. el. 14. 11. 2013. DOI: 10.1093/nar/gkt1113.
- Adzhubei I, Jordan DM, Sunyaev SR. Predicting functional effect of human missense mutations using PolyPhen-2. *Curr Protoc Hum Genet*

- 2013; publikováno el. 25. června 2015. DOI: 10.1002/0471142905.hg0720s76.
22. Robinson JT, Thorvaldsdóttir H, Winckler W, et al. Integrative genomics viewer. *Nat Biotechnol* 2011;29:24–26.
 23. Babraham Bioinformatics – FastQC A quality control tool for high throughput sequence data. Dostupné na [www: https://www.bioinformatics.babraham.ac.uk/projects/fastqc/](https://www.bioinformatics.babraham.ac.uk/projects/fastqc/). Accessed 15 Feb 2018.
 24. Chen S, Huang T, Zhou Y, Han Y, Xu M, Gu J. AfterQC: automatic filtering, trimming, error removing and quality control for fastq data. *BMC Bioinformatics* 2017;18:80.
 25. Schubert M, Lindgreen S, Orlando L. AdapterRemoval v2: rapid adapter trimming, identification, and read merging. *BMC Research Notes* 2016;9:88.
 26. Martin M. Cutadapt removes adapter sequences from high-throughput sequencing reads. *EMBnet.journal* 2011;17:10–12.
 27. Bolger AM, Lohse M, Usadel B. Trimmomatic: a flexible trimmer for Illumina sequence data. *Bioinformatics* 2014;30:2114–2120.
 28. Li H, Durbin R. Fast and accurate short read alignment with Burrows-Wheeler transform. *Bioinformatics* 2009;25:1754–1760.
 29. Langmead B, Salzberg SL. Fast gapped-read alignment with Bowtie 2. *Nat Methods* 2012;9:357–359.
 30. Quinlan AR, Hall IM. BEDTools: a flexible suite of utilities for comparing genomic features. *Bioinformatics* 2010;26:841–2.
 31. Broad Institute. picard: A set of command line tools (in Java) for manipulating high-throughput sequencing (HTS) data and formats such as SAM/BAM/CRAM and VCF. Dostupné na [www: http://broadinstitute.github.io/picard](http://broadinstitute.github.io/picard). Accessed 22 Dec 2017.
 32. Liao Y, Smyth GK, Shi W. featureCounts: an efficient general purpose program for assigning sequence reads to genomic features. *Bioinformatics* 2014;30:923–930.
 33. Fulcrum Genomics. fgbio: Tools for working with genomic and high throughput sequencing data. Dostupné na [www: https://github.com/fulcrumgenomics/fgbio](https://github.com/fulcrumgenomics/fgbio). Accessed 15 May 2018.
 34. Garrison E, Marth G. Haplotype-based variant detection from short-read sequencing. *arXiv:12073907 [q-bio]* 2012. Dostupné na [www: http://arxiv.org/abs/1207.3907](http://arxiv.org/abs/1207.3907). Accessed 15 May 2018.
 35. Van der Auwera GA, Carneiro MO, Hartl C, et al. From FastQ data to high confidence variant calls: the genome analysis toolkit best practices pipeline. *Curr Protoc Bioinformatics* 2013;11:11.10.1–11.10.33.
 36. Lai Z, Markovets A, Ahdesmaki M, et al. VarDict: a novel and versatile variant caller for next-generation sequencing in cancer research. *Nucleic Acids Res* 2016; publ. el. 7. 4. 2016. DOI: 10.1093/nar/gkw227.
 37. Koboldt DC, Zhang Q, Larson DE, et al. VarScan 2: somatic mutation and copy number alteration discovery in cancer by exome sequencing. *Genome Res* 2012;22:568–576.
 38. Andrews TD, Jeelall Y, Talaulikar D, Goodnow CC, Field MA. DeepSNVMiner: a sequence analysis tool to detect emergent, rare mutations in subsets of cell populations. *PeerJ* 2016; publ. el. 24. 5. 2016. DOI: 10.7717/peerj.2074.
 39. Abyzov A, Urban AE, Snyder M, Gerstein M. CNVnator: an approach to discover, genotype, and characterize typical and atypical CNVs from family and population genome sequencing. *Genome Res* 2011;21:974–984.
 40. Medvedev P, Fiume M, Dzamba M, Smith T, Brudno M. Detecting copy number variation with mated short reads. *Genome Res* 2010;20:1613–1622.
 41. Chen K, Wallis JW, McLellan MD, et al. BreakDancer: An algorithm for high resolution mapping of genomic structural variation. *Nat Methods* 2009;6:677–681.
 42. Rausch T, Zichner T, Schlattl A, Stütz AM, Benes V, Korbel JO. DELLY: structural variant discovery by integrated paired-end and split-read analysis. *Bioinformatics* 2012;28:i333–i339.
 43. Wang K, Li M, Hakonarson H. ANNOVAR: functional annotation of genetic variants from high-throughput sequencing data. *Nucleic Acids Res* 2010; publ. el. 3. 6. 2010. DOI: 10.1093/nar/gkq603.
 44. Cingolani P, Platts A, Wang LL, et al. 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 (Austin)* 2012;6:80–92.

Poděkování

Tato práce byla podpořena projektem CEITEC 2020 (LQ1601) za finančního příspěví Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy České republiky v rámci účelové podpory z prostředků Národního programu udržitelnosti II.

Čestné prohlášení autorů

Autoři práce prohlašují, že v souvislosti s tématem, vznikem a publikací tohoto článku nejsou ve střetu zájmů, a vznik ani publikace článku nebyly podpořeny žádnou farmaceutickou firmou.

Podíl autorů na přípravě rukopisu

NT – hlavní autor práce, příprava první verze rukopisu, finalizace rukopisu

FP – spoluautor práce, příprava první verze rukopisu

JK – spoluautor práce, revize a finalizace rukopisu

KP – spoluautor práce, revize a finalizace rukopisu

ŠP – korespondující autor, spoluautor práce, schválení finální verze rukopisu

Doručeno do redakce dne 26. 4. 2018.

Přijato po recenzi dne 15. 5. 2018.

prof. RNDr. Šárka Pospíšilová, Ph.D.

Centrum molekulární medicíny, CEITEC,

Masarykova univerzita

Kamenice 5

625 00 Brno

e-mail: pospislouva.sarka@fnbrno.cz